ETUDE DE LA DENSITE APPARENTE ET DE LA POROSITE DU SOL DANS LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL CROP-NEWS DE KAMBOINSE (BURKINA FASO)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU

MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION **:** Infrastructures et Réseaux Hydrauliques (IRH)

Présenté et soutenu publiquement le 16 juillet 2015 par

Théoneste NSANZIMFURA

Travaux dirigés par :

- **Dr. Dial NIANG Enseignant Chercheur au 2iE**

LABORATOIRE HYDROLOGIE ET RESSOURCES EN EAU (LEAH)

- **Dr. Rabah LAHMAR Chercheur au CIRAD**
- **Mr. Jean Marie DOUZET Chercheur au CIRAD**

CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT (CIRAD)

Jury d'évaluation du stage :

Président: **Dr. Adamah MESSAN**

Membres et correcteurs : **Mr. Roland YONABA**
Mr. Arnauld Louis OUEDRAOGO
Dr. Dial NIANG

Promotion 2014/2015

CITATIONS

« La vie est comme un bicycle, pour garder l'équilibre il faut avancer » Albert Einstein

« En comprenant mieux le sol, nous trouvons qu'il est non seulement plus complexe que l'on imagine, mais aussi qu'il est plus complexe et merveilleux que l'on peut imaginer » Prof. W.R Gardner, 1991

« Après avoir gravi une haute colline, on se rend seulement compte qu'il y a encore beaucoup de collines à gravir » Nelson Mandela

DEDICACES

A Dieu tout puissant pour sa protection dès la naissance à nos jours,

A mes parents pour l'amour, les encouragements et les conseils,

A tous mes sœurs et frère,

A tout le corps professoral de 2iE pour la formation acquise,

A tous les collègues de classe,

A tous mes amis,

A tous ceux qui me sont chers.

«Que Dieu vous bénisse»

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de l'appui et du soutien de plusieurs personnes qu'il me plait de remercier.

Je remercie très sincèrement les responsables administratifs du 2iE de m'avoir accepté comme stagiaire dans cette structure. Au sein de cette institution j'ai appris les rudiments des sciences en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, mes sincères remerciements au corps professoral pour la formation de qualité dont je suis bénéficiaire. Je remercie le CIRAD qui en collaboration avec 2iE m'a accueilli sur le site expérimental Crop-News à Kamboinsé sous son projet ABACO.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude à mes encadreurs :

- Docteur Dial NIANG, enseignant chercheur au 2iE, pour ses sages conseils, des corrections, des remarques, des orientations et des encouragements.
- Docteur Rabah LAHMAR, chercheur au CIRAD en Tunisie, de qui j'ai eu de sages conseils, des orientations et des encouragements.
- Monsieur Jean-Marie DOUZET, chercheur au CIRAD au Burkina Faso, pour sa disponibilité, ses sages conseils, des corrections, des remarques, des orientations, des encouragements et sa collaboration étroite.

Je tiens à remercier Monsieur Alexandre OUEDRAOGO et Monsieur Saïdou YANOGO, observateurs de terrain, Monsieur Mathieu SAWADOGO avec qui j'ai directement collaboré sur le terrain.

Mes sincères remerciements à l'endroit de ma chère future épouse, Mademoiselle Josiane UWINGENEYE, pour son affection, ses conseils et ses encouragements quotidiens.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit de l'Institut d'Enseignement Supérieur de Ruhengeri (INES-Ruhengeri) pour le financement de mes deux années de formation à 2iE au travers de son programme « Capacity Building ».

Enfin, que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de mon travail trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

« Que Dieu vous récompense »

RESUME

Cette étude a été effectuée sur le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé. Cette recherche a été initiée par les projets ABACO et WASSA en vue de procéder à la restauration des sols pour améliorer les rendements. Notre thème qui s'intitule «***Etude de la densité apparente et de la porosité du sol dans le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé***» s'inscrit dans cette dynamique orientée sur une meilleure connaissance des transferts hydriques de ces sols. La connaissance de ces deux paramètres est importante pour l'évaluation du stock d'eau disponible dans la zone racinaire du sorgho et du *Piliostigma reticulatum.*

Compte tenu de l'importance de ces sols, un dispositif expérimental de 25 parcelles a été installé sur les pratiques culturales distinctes (Zaï + Mulch, Zaï + Mulch + *P. reticulatum*, semis direct + Mulch + *P. reticulatum)*. Pour pouvoir mener cette étude, nous avons procéder à des prélèvements d'échantillons de sols de 10 cm de la surface jusqu'à 60 cm qui ont été traités au laboratoire.

Les résultats de cette étude montrent que le sol du site est moins dense à la surface sur les 20 premiers centimètres et plus dense en profondeur (dans les 20 derniers centimètres).

L'effet du *P. reticulatum* également s'est fait ressentir sur les parcelles sous des arbustes avec des taux d'humidité volumique variant de 10,0 à 29,9 %. Par contre sur les parcelles sans arbustes l'humidité tourne autour de 6,8 à 14,8 % à la surface du sol. Nous remarquons aussi que les valeurs de la densité apparente et de la porosité varient peu en surface (0-20 cm) sur les parcelles sous Zaï.

Mots Clés :

1 – Densité apparente
2 – Porosité
3 – Profil hydrique
4 – Sol
5 – Techniques culturales

ABSTRACT

This study was performed on the experimental Crop-News site of Kamboinsé. This research was initiated by ABACO and WASSA projects to carry out soil restoration to improve yields. Our theme entitled «***Etude de la densité apparente et de la porosité du sol dans le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé***» is part of this dynamic focused on a better understanding of water transfer in these soils. Knowing these two parameters is important for evaluating the available stock of water in the root zone of sorghum and *Piliostigma reticulatum*.

Given the importance of these soils, an experimental site of 25 plots was installed on the distinct Agricultural practices (Zaï + Mulch, Zaï + Mulch + *P. reticulatum*, semis direct + Mulch + *P. reticulatum*). To conduct this study, we conduct sampling of soil of 10 centimeters from the surface to 60 centimeters who were treated in the laboratory. The results of this study show that the soil at the experimental site is less dense at the surface on the first 20 centimeters; denser in depth (in the last 40 centimeters).

The effect of *P. reticulatum* was also remarkable in the parcels with shrubs with volumetric moisture content ranging from 10.0 to 29.9%. By the other side the plots without shrubs moisture vary from 6.8 to 14.8 % at the surface. We also note that the values of bulk density and porosity vary little at the surface over the plots with Zaï.

Keywords:

1 – Bulk density
2 – Porosity
3 – Water Profile
4 – Soil
5 – Agricultural practices

LISTE DES ABREVIATIONS

% : pourcentage,

°C : degré Celsius,

2IE : Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement,

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement,

cm : centimètre,

cm^3 : centimètre cube,

CNRST : Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique,

CRREA : Centre Régional de Recherches Environnementales et Agricoles,

Da : Densité apparente,

g : gramme,

g/cm^3 : gramme par centimètre cube

HSD : High Shrub Density,

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles,

LSD : Low Shrub Density,

MSD : Medium Shrub Density,

n: porosité totale,

NS : No Shrub,

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (actuellement appelé IRD, Institut de Recherche pour le Développement),

P. reticulatum: Piliostigma reticulatum,

WASSA : Woody Amendments for Sudano-Sahelian Agriculture.

TABLE DES MATIERES

CITATIONS i
DEDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
LISTE DES ABREVIATIONS vi
TABLE DES MATIERES vii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES FIGURES x
LISTE DES PHOTOS xi
I. INTRODUCTION 1
1. Introduction générale 1
2. Le projet ABACO 1
3. Les objectifs 2
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 3
1. L'état du sol au Burkina Faso 3
2. Les pratiques culturales sur le site expérimental 3
a. Le Zaï 4
b. Le mulch (Paillage) 5
c. Le Piliostigma reticulatum 6
3. Quelques propriétés physiques du sol 8
a. La densité apparente 8
b. La porosité 9
III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 12
1. La localisation géographique du site expérimental 12
2. Les caractéristiques de la zone d'étude 13
a. Le climat 13
b. Le sol 14
c. La végétation 14
IV. MATERIEL ET METHODES 15
1. Le site expérimental 15
2. L'échantillonnage 15

a. Les procédures d'échantillonnage 15
b. Les matériels d'échantillonnage 20
c. Calcul des paramètres recherchés 21
V. RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSION 23
1. Résultats 23
2. Analyses et Discussion 26
a. Étude de la densité apparente et de la porosité 26
b. L'évolution spatiale de la densité apparente. 29
c. Relation entre la porosité totale et le profil hydrique. 37
CONCLUSIONS 39
RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES 40
BIBLIOGRAPHIE 41
ANNEXES ..... A

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Le récapitulatif de la densité apparente et de la porosité du sol du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé (pour quelques parcelles). 27
Tableau 2 : La moyenne de la densité apparente et de la porosité de chaque parcelle à chaque profondeur 30
Tableau 3: Les parcelles dont l'écart-type est inférieur ou égal à 5,0 % de porosité totale 36

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation géographique du site expérimental Crop-News de Kamboinsé 12
Figure 2 : Numérotation des parcelles élémentaires dans le dispositif expérimental. 17
Figure 3: Numérotation des positions dans chacune des parcelles élémentaires. 18
Figure 4 : Illustration du profil hydrique 22
Figure 5: Courbes de variation de la densité apparente en fonction de profondeur (à titre d'exemple; une courbe par bloc) 24
Figure 6: Courbes de variation de la porosité en fonction de profondeur (à titre d'exemple; une courbe par bloc) 25
Figure 7: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de la profondeur 26
Figure 8 : Evolution de la densité apparente avec la densité des arbustes (0-60 cm) 32
Figure 9 : Evolution de la densité apparente avec le Zaï (0-20 cm) 33
Figure 10 : Evolution de la densité apparente entre les parcelles (0-60 cm) 34
Figure 11 : Evolution de la densité apparente entre les blocs (0-20 cm) 35
Figure 12 : Courbe de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (courbe représentative des tubes rapprochés des arbustes) 37
Figure 13 : Courbe de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (courbe représentative des tubes éloignés des arbustes) 38

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Parcelle de Zaï..... 5
Photo 2 : Mulch dans une Parcelle. 6
Photo 3 : *P. reticulatum* dans une parcelle (*P. reticulatum* pur) 8
Photo 4 : Localisation du site expérimental Crop-News de Kamboinsé sur Google earth..... 13
Photo 5 : Les échantillons dans des sachets et papiers aluminium. 19
Photo 6 : Illustration des matériels d'échantillonnage..... 20
Photo 7 : L'étuve et la balance utilisées. 21

I. INTRODUCTION

1. Introduction générale

Le sol, jusqu'aux périodes récentes, a été envisagé d'un point de vue particulariste et purement utilitaire comme le milieu où se développe le système radiculaire des végétaux. L'agriculture étant aussi vieille que le monde, il n'est pas surprenant que cette conception de soit imposée dès l'abord. Quant aux sols agricoles, ils proviennent de la transformation par l'homme des sols vierges, par l'application des méthodes de l'agriculture, dans un but purement économique : l'obtention des récoltes. Cette intervention a pour résultat de modifier profondément la morphologie, la composition et les propriétés du milieu (Demolon, 1966).

On peut donc considérer le sol comme un système composé de quatre compartiments : les trois phases, solide, liquide et gazeuse et les organismes vivants. Ces compartiments sont en interaction permanente par des échanges de matière et d'énergie dus à plusieurs phénomènes physiques, chimiques et biologiques et rendent compte de l'ensemble des processus de pédogenèse et des fonctions du sol. Les sols sont des milieux poreux. Les proportions des trois phases sont variables en fonction, notamment, de l'état hydrique des sols et des contraintes mécaniques qu'ils subissent. Toutefois, le volume et la masse de la phase solide sont moindres comparés à celles deux autres phases (Calvert, 2003).

En principe, on ne peut pas estimer la compaction à l'œil nu ; les mesures directes (in situ) et indirectes sont utilisées. Pour évaluer cette forme de dégradation physique du sol, différentes mesures physiques s'effectuent sur un sol témoin. Notre étude se focalisera sur les mesures de la densité apparente et de la porosité totale du sol dans le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé (Burkina Faso) sous financement du projet ABACO.

2. Le projet ABACO

Le projet ABACO (Agroecology-based aggradation-conservation agriculture) a pour objectif global de réduire la vulnérabilité des producteurs à la variabilité climatique en renforçant leur capacité pour concevoir, évaluer, mettre en œuvre et adopter des options d'agriculture de conservation basées sur les principes de l'agro-écologie en vue de combattre la dégradation des sols et l'insécurité alimentaire dans les régions semi-arides et subhumides en Afrique.

Le challenge est important en Afrique de l'ouest où l'augmentation du prix des fertilisants minéraux incite à réfléchir à des modes de gestion innovante de la fertilité des sols.

L'agriculture de conservation qui repose sur trois principes généraux (travail minimal du sol, couverture végétale permanente du sol, rotations et/ou associations culturales) constitue l'une de ces possibilités. Mais sa mise en application reste problématique du fait de la forte pression agropastorale, des règles traditionnelles de vaine pâture, des modes de tenure foncière. L'enjeu de ce projet est alors d'analyser les conditions particulières de mise en œuvre de l'agriculture de conservation et d'adopter des principes de l'agriculture de conservation pour co-construire de nouveaux systèmes de culture et même d'améliorer la fertilité des sols, la sécurité alimentaire et l'offre fourragère dans la zone soudanienne.

Dans le but de réaliser un suivi continu et de mieux comprendre les propriétés hydriques du sol liées au processus d'intégration d'arbustes natifs dans le système de cultures, le dispositif expérimental Crop-News localisé sur le site de 2iE à Kamboinsé (15 km de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso) a été créé par Rabah Lahmar (Cirad et 2iE) dans le cadre dudit projet. Ce dispositif expérimental consiste à l'intégration du *P. reticulatum* dans le système de culture du sorgho blanc avec le Zaï et le semis direct manuel comme modes de gestion du sol.

3. Les objectifs

L'objectif général de notre étude sera d'étudier la densité apparente et la porosité totale du sol, à différentes profondeurs de 0 à 60 cm, en relation avec les pratiques culturales sur le site expérimental Crop-News de Kamboinsé.

Spécifiquement cette étude cherchera à :

i. étudier les deux propriétés physiques du sol : la densité apparente et la porosité totale,
ii. déterminer l'évolution spatiale de la densité apparente à des profondeurs différentes,
iii. établir la relation entre la porosité totale et le profil hydrique du sol jusqu'à une profondeur de 60 cm.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. L'état du sol au Burkina Faso

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions représentent une forte proportion des sols du Burkina ; ils sont rencontrés dans différentes zones agro-climatiques et au niveau d'unités morphologiques variables (buttes résiduelles, glacis, levées alluviales,...) ; ils ne sont pas caractérisés par une formation végétale précise et leur influence au niveau de la végétation semble se situer au niveau de sa composition spécifique. Ce sont des sols profonds (> 1,2 m) comportant un taux d'éléments grossiers variable (5 à 40 – 60 % de concrétions) suivant la profondeur ; ils ont en général une structure massive faiblement développée et une texture limono-sableuse à limono-argilo-sableuse en surface et argilo-limoneuse à argileuse en profondeur. Ils sont pauvres en matière organique, en azote, en phosphore, en potassium et ont une capacité totale d'échange faible. La somme des bases échangeables y est faible et la réaction du sol est légèrement acide à acide. Leur réserve en eau utile est faible (Pallo et Thiombiano, 1989).

Sur la base d'autres études de l'ORSTOM, le Bureau National des Sols (BUNASOL) a classé l'ensemble des sols du pays en huit groupes principaux (Peron, 1975), dont les caractéristiques et les contraintes ont été révélées par les différentes études (Jenny, 1964). Il s'agit de sols ferrugineux tropicaux : 39 %, sols peu évolués : 26 %, sols hydromorphes : 13 %, sols bruns eutrophes : 6 %, sols vertisols : 6 %, sols halomorphes à structure dégradée : 5 %, sols minéraux bruts : 3 % et sols ferralitiques : 2 %. Il est à noter que l'état du sol au Burkina Faso n'est pas favorable pour l'agriculture, ce qui contraint à s'adapter en l'améliorant soit par l'utilisation d'engrais soit par des pratiques culturales de conservation de l'eau dans le sol.

2. Les pratiques culturales sur le site expérimental

Les pratiques culturales sur le site expérimental sont le Zaï, ou le semis direct, le Mulch (Paillage) et l'association avec *P. reticulatum*. Sur le dispositif expérimental on fait la combinaison de ces pratiques culturales ; Zaï + Mulch, Zaï + Mulch + *P. reticulatum*, semis direct + Mulch + *P. reticulatum.* Hormis la parcelle 26, où on a uniquement le Zaï (parcelle témoin de Zaï) et la parcelle 25, où on a les *P. reticulatum* purs mais on y cultive rien (parcelle témoin de *P. reticulatum*).

a. Le Zaï

En langue Mooré, Zaï vient du mot "zaïégré" qui veut dire « *se lever tôt et se hâter pour préparer sa terre* » (Roose et al., 1995).

Le Zaï est une technique culturale traditionnelle originaire d'Afrique de l'Ouest (Mali, Niger et Burkina Faso) aujourd'hui principalement pratiquée par la population du Nord du Burkina Faso (Yatenga). Elle y réapparut dans les années 1980 à la suite des périodes de sècheresse connues dans l'ensemble du Sahel après avoir été plus ou moins abandonnée à la suite de la période d'abondance (1950-1970), de l'éclatement des familles et de la mécanisation de la préparation des nouveaux champs.

Le Zaï est une forme particulière de culture en poquet permettant de concentrer l'eau et la fumure (1 à 3 tonnes/ha) dans des micros bassins (30 à 40 cm de diamètre, 10 à 15 cm de profondeur) creusés à la daba (pioche à manche courte), en quinconce tous les 80 cm, où les grains seront semés (une douzaine de graines de sorgho sur les terrains lourds, ou du mil dans les terres sableuses ou gravillonnaires). La terre retirée du trou est déposée en croissant en aval des trous afin de limiter l'érosion et piéger dans les poquets les sables, limons et matières organiques transportés par le vent. La surface de sol qui n'est pas travaillée autour des trous sert d'impluvium, et permet donc d'augmenter la quantité d'eau retenue dans les poquets. Les matières organiques déposées dans chaque micro bassin avant la période des pluies attirent les termites qui creusent des galeries jusqu'à la surface ; ces structures biogéniques tapissées de fèces riches en minéraux permettant l'infiltration de l'eau et la formation de poches d'eau en profondeur, à l'abri de l'évaporation rapide, qui sont exploitées par les racines entre deux pluies.

On recouvre le poquet d'un peu de terre afin que les matières organiques ne soient pas emportées par le ruissellement dès les premières pluies importantes. La présence de ces matières organiques (compost ou engrais) et l'utilisation de variétés adaptées de céréales permettent de multiplier le rendement. Cette technique particulière est restée pendant longtemps considérée comme anecdotique par les chercheurs mais fait de nos jours partie des techniques de conservation des eaux et des sols.

Cependant, la pratique du Zaï connaît aussi des limites. Elle peut réduire l'impact d'une sécheresse de 2 à 3 semaines si le sol peut stocker suffisamment d'eau (ce qui n'est pas le cas

des sols trop superficiels ou trop caillouteux), mais le Zaï ne peut fonctionner de façon satisfaisante s'il ne pleut pas assez (minimum 400 mm avec une capacité de stockage du sol de 50 mm). De même, s'il pleut trop, la culture risque de souffrir d'engorgement. La zone optimale d'application du Zaï semble limitée à la zone soudano-sahélienne (entre 400 et 800 mm) mais cela devrait encore être précisé en fonction des plantes et des sols. Même dans la zone soudano-sahélienne, l'extension du Zaï est limitée par la disponibilité en main d'œuvre et en fumier (Roose et al., 1995).



Photo 1: Parcelle de Zaï

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).

b. Le mulch (Paillage)

Le mulch, encore appelé « paillis », désigne une couche généralement peu épaisse formée par un ou plusieurs éléments, le plus souvent, disposés à la surface du sol et parfois dressés (Dan, 2002; Lahmar et al., 2011).

Le paillage est une excellente solution de rechange aux herbicides pour protéger les semis de la végétation concurrente qui recherche la lumière, les éléments nutritifs et l'humidité. Lorsque du paillis est placé autour de la base d'un semis, il favorise sa croissance et sa survie en empêchant les autres plantes de germer ou de croître. Selon la structure du paillis et le matériel qui le compose, certains paillis peuvent même aider les semis à croître en élevant la température du sol et en retenant la chaleur pendant les soirées fraîches. Ces paillis peuvent aussi protéger les plantes des températures extrêmes.

Tous les paillis protègent les plantes contre la sécheresse en captant l'humidité sous leur structure. Les paillis les plus efficaces permettent aussi à l'air d'atteindre le sol pour faire évaporer l'eau en excès (Ministère des Richesses naturelles et Centre de ressources pour propriétaires fonciers., 1994).

La technique de paillage est très ancienne et très répandue dans la région sub-saharienne. Elle consiste à couvrir le sol d'une couche de matière organique de qualité variée. Le paillage contribue à l'amélioration de la structure du sol, à réduire l'évaporation et à augmenter l'infiltration (Ambouta et al., 2009). Les agriculteurs utilisent couramment cette technique parce qu'elle permet aussi de réguler la température du sol en toute saison et de limiter ainsi les chocs thermiques, de diminuer ou exclure la présence des plantes non désirées, de repousser certains insectes et abriter une faune utile et de maîtriser le développement des adventices en interceptant le rayonnement solaire nécessaire à la germination.



Photo 2 : Mulch dans une parcelle.

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).

c. Le Piliostigma reticulatum

C'est une espèce qui appartient à la famille des Césalpiniacées. L'espèce est rencontrée généralement dans les jeunes jachères ou dans les bas-fonds. En fonction de la zone, elle peut se présenter sous forme d'arbuste atteignant 4 à 5 m de hauteur. Le plus souvent, elle se présente sous forme buissonnante avec de nombreux rejets (Traoré, 2000).

P. reticulatum a un système racinaire à extension mixte caractérisée par un pivot court avec un réseau latéral plus ou moins étendu (Bamba, 1985). Selon Ganaba, (1994), c'est ce type morphologique qui caractérise les arbustes des zones sahéliennes, ce qui d'une part leur permet d'atteindre des profondeurs où le sol reste longtemps humide, de récupérer l'eau superficielle et d'autre part, d'assurer une fonction de fixation mécanique tout en jouant un rôle dans la nutrition minérale. Ce n'est généralement pas en agriculture que la plante intervient, elle est utilisé en élevage comme nourriture des animaux domestiques (ses feuilles et gousses), en médecine traditionnelle pour soigner de nombreux maladies : le rachitisme, l'anorexie, la dysenterie, les fièvres infantiles (ses feuilles, racines et écorces) et aussi en fabrication artisanales : manches d'outils, paniers, pilons, mortiers etc.

Le bon développement des cultures associées à *P. reticulatum* est lié à la maîtrise de la gestion de l'espèce par les paysans. Le paillage des zones dégradées du champ, réalisé suite à la coupe à ras des jeunes rejets généralement d'un an, permet d'obtenir une décomposition plus rapide de la matière organique. En début de campagne agricole, le paillage des zones encroutées de champ par la biomasse foliaire de *P. reticulatum* favorise une bonne croissance des cultures associées et donc un bon rendement. Le paillage permet de conserver une certaine humidité dans le sol, favorable à la croissance végétale des cultures. En outre, les feuilles de *P. reticulatum* contiennent des éléments minéraux (Diack et al., 2000) qui améliorent la structure et la fertilité des sols dégradés. C'est ce qui expliquerait les rendements élevés que les paysans disent obtenir avec la biomasse foliaire de *P. reticulatum* sur ces sols pauvres. L'engouement des paysans pour la pratique du paillage avec les feuilles de *P. reticulatum* s'explique donc par la récupération rapide de ces sols grâce à la décomposition foliaire (Bationo B. et al., 2007).



Photo 3 : *P. reticulatum* dans une parcelle (*P. reticulatum* pur)

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).

3. Quelques propriétés physiques du sol

La référence est faite sur le thème de notre étude, les propriétés physiques du sol à étudier sont la densité apparente et la porosité totale.

a. La densité apparente

La densité est un poids par unité de volume, normalement exprimée en gramme par centimètre cube (g/cm^3). L'eau a une densité de 1 g/cm^3 (à 4^o C). Deux types de mesures de densité sont utilisés généralement pour les sols. La densité réelle (dr) correspond à la densité d'une terre sèche désagrégée : la moyenne pour le sol est de 2,65 g/cm^3 ; la densité apparente (da) correspond au poids sec d'un volume de sol dont la structure n'a pas été perturbée. Il est aussi la masse d'une unité de volume du sol séché à 105 °C. Ce volume comprend aussi bien les solides que les pores. Elle est mesurée par la méthode des cylindres en utilisant les échantillons non perturbés, connaissant le poids sec constant des échantillons à 105 °C et le volume des cylindres des prélèvements utilisés (Blake & Hartage, 1986). La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du matériau et indirectement, la porosité totale (Alongo et Kambele, 2013).

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol (Chawel, 1977).

Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines (Maertens, 1964), la cohésion des horizons (Yoro, 1983; Yogo et Assa, 1986) et la réserve en eau du sol (Henin et al., 1969).

b. La porosité

Comme tout milieu à caractère discontinu, le sol peut être considéré comme un assemblage de pleins et de vides, l'organisation des uns conditionnant les caractéristiques des autres. Les pleins sont constitués par la phase solide, squelette et plasma (argile + substances organiques et colloïdales diverses). Les vides occupés par les phases liquides et gazeuses représentent le système poral, siège des phénomènes de transfert, dont l'importance est évidente sur le plan du fonctionnement physico-hydrique des sols (Chretien et al., 1987).

D'une manière générale, la porosité d'un sol est définie comme étant sa capacité à l'état solide à se laisser pénétrer par un fluide, appelée : capacité d'absorption; elle est dépendante de l'importance du pourcentage des vides que contient le sol. Par ailleurs, et vu l'importance de ce paramètre de porosité dans la texture des sols et selon Bir (2012) on distingue,

i. La porosité géométrique ou porosité totale : Ø

Elle permet de connaitre l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides (Vv) accessible à l'eau et à l'air au volume total apparent (V), du sol. La porosité est toujours inférieure à 1, elle peut aussi être exprimée en pourcentage.

$$\emptyset = \frac{Vv}{V}$$

ii. L'indice des vides : e

Les sollicitations auxquelles sont soumis les sols produisent des variations du volume des vides (Vv) qui entrainent des variations du volume apparent (V), aussi préfère-t-on souvent rapporter le volume des vides non pas au volume apparent de l'échantillon mais au volume des particules solides (Vs), lequel peut être considéré comme invariant.

On définit alors l'indice des vides, note **e**, dont la signification est analogue à celle de la porosité. Il est défini par la relation,

$$e = \frac{Vv}{Vs}$$

iii. La porosité efficace : Øe, ou porosité cinématique

-**la porosité efficace** est celle qui est occupée par l'eau qui s'écoule, c'est donc celle qui devrait intéresser en premier les hydrologues ! La définition exacte de la porosité efficace est le rapport du volume d'eau qui est extrait par gravité (Vg), sur le volume total (V), et le milieu doit être initialement saturé en eau, cette définition exclut l'eau liée de la porosité efficace. Elle est exprimée en pourcentage par la relation,

$$Øe = \frac{Vg}{V}$$

-**la porosité cinématique** est conceptuellement proche de la porosité efficace mais diffère par sa définition; c'est le rapport de la vitesse d'écoulement de l'eau sur la vitesse de Darcy (calculée suivant la loi de Darcy).

On peut ajouter d'autres paramètres liés spécifiquement aux milieux non saturés, tels que,

iv. La porosité de drainage : Ød

Elle est définie comme étant la fraction de la porosité correspondant à un écoulement rapide.

Elle correspond au rapport entre le volume total des particules d'eau s'écoulant gravitairement à travers l'échantillon de sol considéré et le volume total de ce même échantillon.

Dans la pratique, on considère que la porosité cinématique et la porosité de drainage sont similaires, elles sont donc regroupées sous le terme de « porosité efficace ». Le plus souvent la porosité de drainage est assimilée à la porosité efficace, et ce à cause de la difficulté, dans la pratique, de différencier l'une de l'autre. Leur complémentaire par rapport à la porosité totale est nommé capacité de rétention capillaire. La quantité d'eau restant dans l'échantillon permet par ailleurs d'estimer la capacité de rétention d'un sol (Blondel, 2001).

v. La capacité de rétention : Øret

Elle est définie comme étant la différence entre la porosité totale et la porosité de drainage, représentant la partie du volume des vides non drainés. Elle est exprimée par la relation,

$$Øret = Ø - Ød$$

Il est à noter que pour une étude concernant l'estimation de la quantité d'eau s'écoulant par drainage au travers un horizon peu perméable ou aquitard, il est nécessaire de considérer la porosité de drainage (écoulement gravitaire en milieu peu perméable ou aquitard).
Dans le cas d'une estimation des vitesses d'écoulement des eaux souterraines en milieu perméable ou aquifère, la porosité cinématique sera utilisée (écoulement latéral ou longitudinal lie au gradient hydraulique du milieu poreux saturé perméable ou aquifère).
La porosité efficace, et son paramètre complémentaire la capacité de rétention, dépendent du type de sol considéré (Blondel, 2001).

La porosité du sol est une caractéristique majeure contrôlant les propriétés hydrodynamiques du sol et le développement racinaire des plantes, mais aussi un indicateur physique de la qualité du sol influencée par les différentes techniques culturales. La porosité du sol joue un rôle important dans les échanges hydriques et gazeux. Elle est souvent sujette à des modifications variables lorsque les sols sont compactés (Lahlou et al., 2005).

Généralement, la compaction affecte la qualité physique du sol, elle réduit la porosité, ce qui entraîne une mauvaise aération du sol, un mauvais drainage et augmente la résistance à la pénétration des racines, par conséquent réduit la croissance et le rendement de la récolte (McBride et al., 1989).

L'espace poral peut être divisé en deux classes correspondant à des types de fonctionnement différents : la macroporosité, représentée par la porosité efficace µ (ou porosité de drainage) qui englobe les pores d'un diamètre équivalent supérieur à une valeur de l'ordre de 10 µm (la limite varie entre 6 et 30 µm), et la microporosité qui correspond au volume relatif occupé par les pores de diamètre équivalent inférieur à 10 µm (Mermound, 2010).

Ouattara et al., (1998) ont montré que la modification de la porosité des sols limono-sableux de Burkina Faso sous l'effet de la mise en culture constitue l'une des causes fondamentales de la baisse de la fertilité physique de ces sols. L'intensité de la compaction est souvent mesurée à l'aide de la densité apparente. Cependant, ce paramètre est insuffisant pour connaître la nature et la distribution de la taille des pores, responsables des variations de densité apparente lorsqu'elles sont enregistrées (Bruand et al., 1993). La détermination de la porosité d'un matériau nécessite la mesure de deux grandeurs : sa densité de solide (ou densité réelle) et sa densité apparente (Chretien et al., 1987). La porosité décrite en général est la porosité totale.

III. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. La localisation géographique du site expérimental

La zone d'étude est le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé, localité située dans la province de Kadiogo à 15 km au Nord de la capitale burkinabè sur l'axe routier N_{22} Ouagadougou-Kongoussi. Ses coordonnées géographiques sont : 12° 27' 59,86" latitude Nord et 01° 32' 57,14" longitude Ouest en DMS (degrés, minutes, secondes) avec une altitude d'environ 296 mètres.

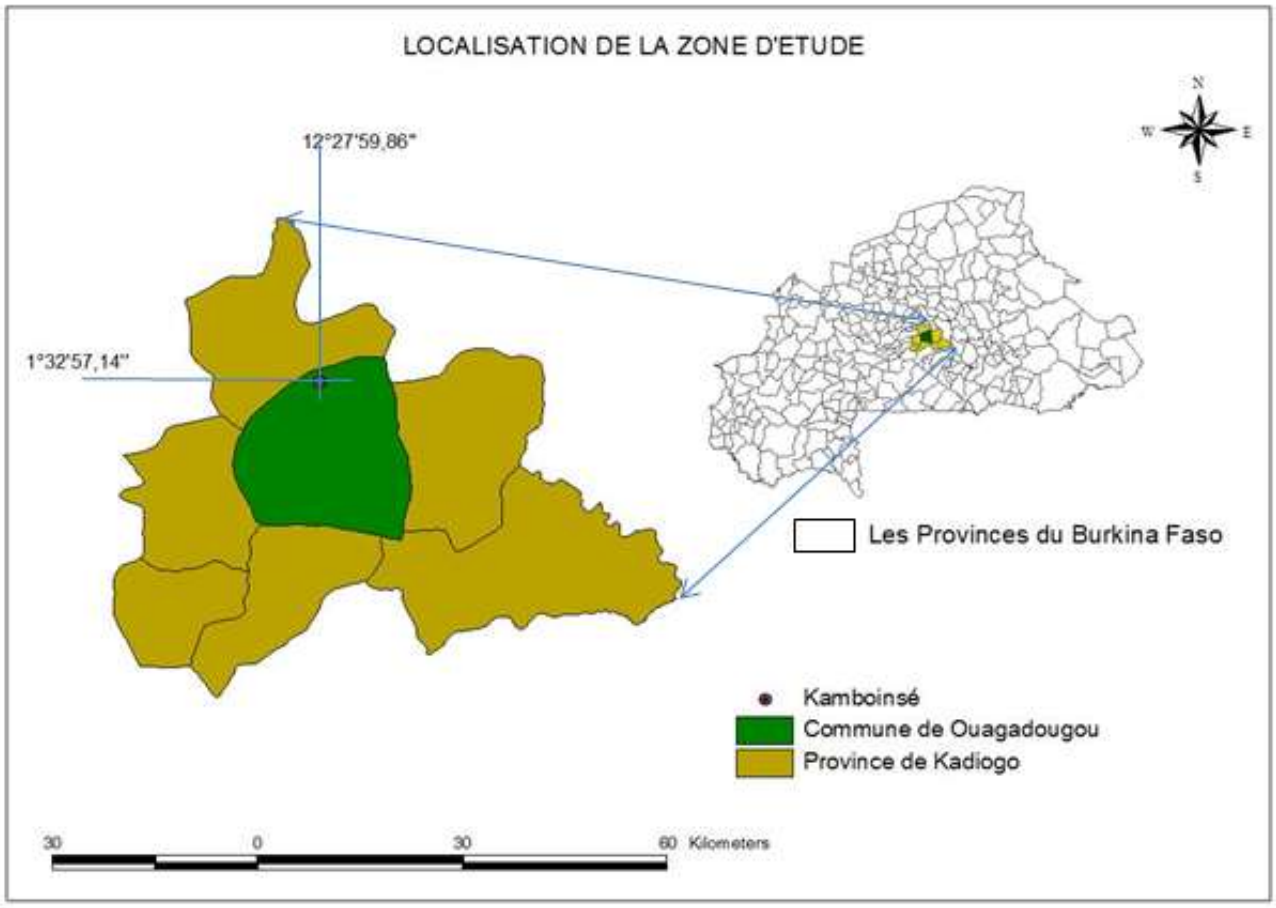


Figure 1 : Localisation géographique du site expérimental Crop-News de Kamboinsé

Source : ArcView GIS.



Photo 4 : **Localisation du site expérimental Crop-News de Kamboinsé sur Google earth.**

Source : Google earth ; image satellite du 10/03/2015.

2. Les caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude est caractérisée par les trois éléments que sont le climat, le sol et la végétation.

a. Le climat

La zone d'étude présente les mêmes caractéristiques que les autres régions du plateau central du Burkina Faso, un climat de type nord soudanien, avec deux saisons principales: une saison sèche de novembre à mai et une saison pluvieuse de juin à octobre.

La saison sèche se subdivise en deux périodes:

- ✓ une période sèche et fraîche qui va de novembre à février durant laquelle souffle l' harmattan, vent venant du nord ;
- ✓ une période sèche et chaude à partir de mars qui précède l'installation des pluies (Traoré, 2000).

b. Le sol

Selon la classification française, les sols du dispositif expérimental Crop-News sont de type ferrugineux tropical lessivé à tâche et concrétion.
Une analyse des premiers centimètres du profil du sol montre :

- un horizon, 0-20 cm, constitué de la terre arable de couleur grisâtre ;
- un horizon, 20-40 cm, fait d'un mélange de terre arable et de latérite ;
- un horizon inférieur à 40 cm, formé d'une cuirasse latéritique de forte densité.

Aussi, la teneur en matière organique est très faible alors que celle de l'argile augmente avec la profondeur.

c. La végétation

Kamboinsé est une localité située dans la zone périurbaine au nord de Ouagadougou, dans le secteur phytogéographique soudanien septentrional (Zerbo, 1995). La végétation originelle de cette localité est de plus en plus réduite pour des besoins d'habitations et d'infrastructures.
Les quelques superficies laissées encore à l'état naturel témoignent d'une végétation dominée par une savane arbustive claire, parsemée de quelques grands arbres et d'une strate herbacée (Bunasol, 2000).
Dans la formation arbustive, on distingue les espèces dominantes suivantes (noms scientifiques suivis des noms en (mooré)) : *Combretum micranthum* (Kuiguenga), *Parkia biglobosa* (Néré), *Tamarindus indica* (Pousgo), *Piliostigma reticulatum* (Baguendé), *Diospyros mespiliformis* (Gaanka). Dans la strate herbacée, dominante au niveau des jachères et des bordures des sentiers, on peut trouver *Loudetia togoensis, Andropogon gayanus, Andropogon pseudapricus, Cassia tora, Ctenium elegans* et *Schoenefeldia gracilis*. Sur les terrasses alluviales et le long des cours d'eau comme celui du barrage de Kamboinsé se situant non loin de notre site d'étude, se développe une végétation dominée par *Mitragyna inermis, Anogeissus leocarpus, Khaya senegalensis* (Bunasol, 2000; Inera, 1995).
Les champs cultivés comportent des cultures annuelles, mil et sorgho. A proximité des points d'eau et du barrage de Kamboinsé sont cultivées des espèces maraichères comme l'oignon, le piment, le concombre, le choux, la tomate etc. (Bunasol, 2000).

IV. MATERIEL ET METHODES

1. Le site expérimental

La description du site expérimental

Le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé, installé en 2012, est dédié à l'étude de l'association céréale-arbustes natifs. On y teste sur le long terme quatre (04) densités croissantes d'arbustes (# 0, 500, 1000 et 2000 arbustes à l'hectare) et deux méthodes de gestion du sol (Zaï et semis direct manuel).

Le site occupe une superficie totale de 2,34 hectares, avec 644 mètres de périmètre, et est entièrement clôturé. Il est subdivisé essentiellement en deux grandes parties. La première partie d'environ 0,81 ha est laissée à l'état naturel mais on peut y faire des tests.

La seconde partie est composée de 26 parcelles, chacune avec 13,6 m x 20 m comme dimensions, soit une superficie de 272 m^2. Ces parcelles sont regroupées en quatre blocs distincts de six parcelles et les deux restantes en annexe, et sont accessibles par des voies principales nord-sud larges de 9,2 m et est-ouest de 5,6 m. Il y a aussi des voies secondaires nord-sud larges de 4,6 m et est-ouest de 3,2 m.

2. L'échantillonnage

a. Les procédures d'échantillonnage

L'étude est destinée à déterminer la densité apparente et la porosité totale des horizons du sol des 25 parcelles cultivées du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé selon les procédures suivantes :

La densité apparente et la porosité totale sont mesurées dans trois (3) positions différentes dans chaque parcelle élémentaire comme indiquées dans le protocole ; ces positions sont préfixées en colonne, de 1 à 17, et en lignes, de 1 à 25, dans chacune des parcelles.

Exemple pour la parcelle 1:
Le premier point est localisé entre les colonnes 5 et 6 (C5/6) et entre les lignes 3 et 4 (L3/4);
Le second point est localisé entre les colonnes 12 et 13 (C12/13) et entre les lignes 11 et 12 (L11/12);
Le troisième point est localisé entre les colonnes 5 et 6 (C5/6) et entre les lignes 19 et 20 (L19/20).

Les mesures ont été prises de 10 en 10 cm, de 0 à 60 cm de profondeur. Soit six (06) densités par position et 18 par parcelle élémentaire et, 18 x 25 = 450 mesures dans le dispositif principal (25 parcelles). Mais il y a eu des parcelles où on n'a pas pu aller jusqu'à 60 cm à causer de la roche, donc au total c'est 430 mesures qu'on a pu effectuer.

On prélevait les deux (2) premiers horizons et pour des raisons pratiques d'accès de la tarière, on arrosait la localisation 24 heures avant de continuer l'opération. Les échantillons ont été gardés dans des sachets numérotés pour éviter les erreurs.

La numérotation a été faite de la façon suivante:

Numéro parcelle, numéro position dans la parcelle, numéro position de l'échantillon de la surface vers la profondeur ; les parcelles sont numérotée de 1 à 24 plus 26 (figure 2) ; les numéros des positions sont 1,2 et 3 respectivement amont, médiane et aval (voir figure 3) ; les numéros des échantillons sont 1, 2, 3, 4, 5 et 6 respectivement pour 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 et 50-60 cm.

Exemple:

111 = densité apparente de l'horizon 0-10 cm de la position amont de la parcelle 1 ;

523 = densité apparente de l'horizon 20-30 cm de la position médiane de la parcelle 5;

2036 = densité apparente de l'horizon 50-60 cm de la position aval de la parcelle 20.

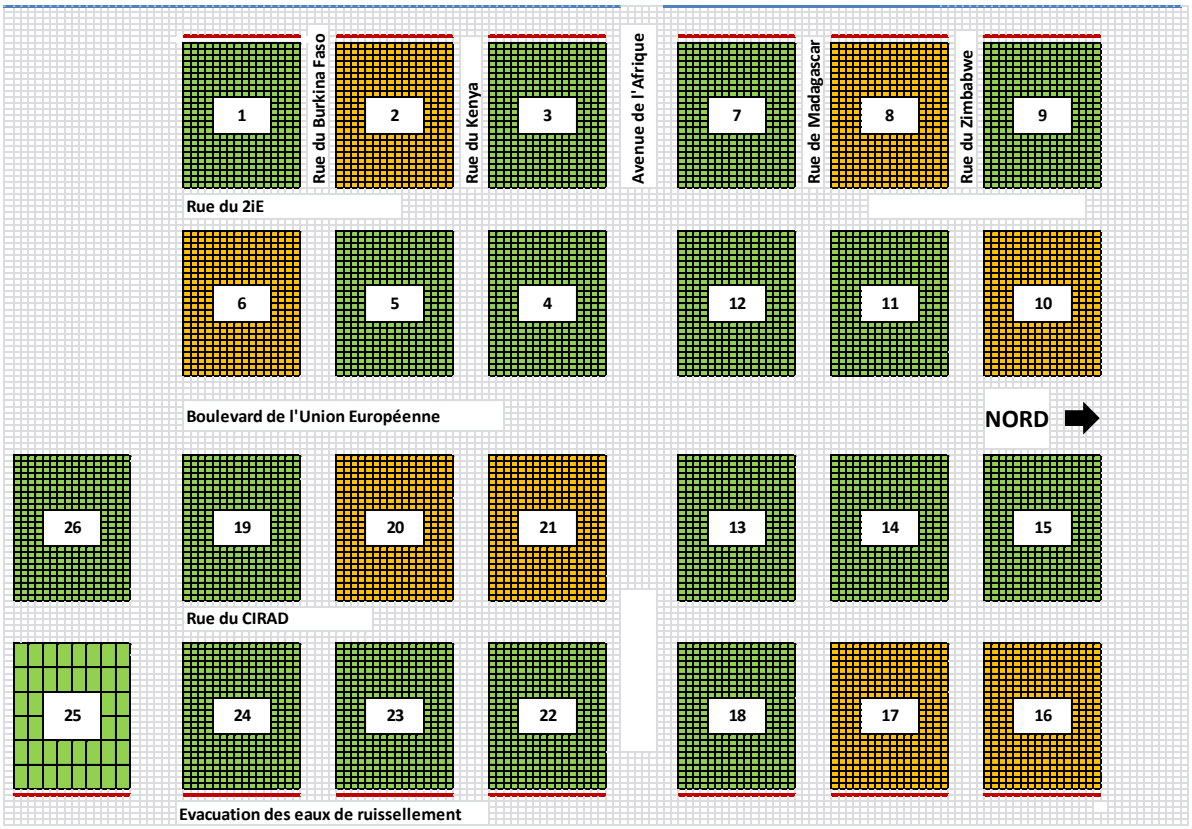


Figure 2 : Numérotation des parcelles élémentaires dans le dispositif expérimental.

Les parcelles sont groupées en blocs, le bloc I (parcelle 1 à 6), le bloc II (parcelle 7 à 12), le bloc III (parcelle 13 à 18) et le bloc IV (parcelle 19 à 24), en fin l'annexe compose de 2 parcelles (25 et 26).

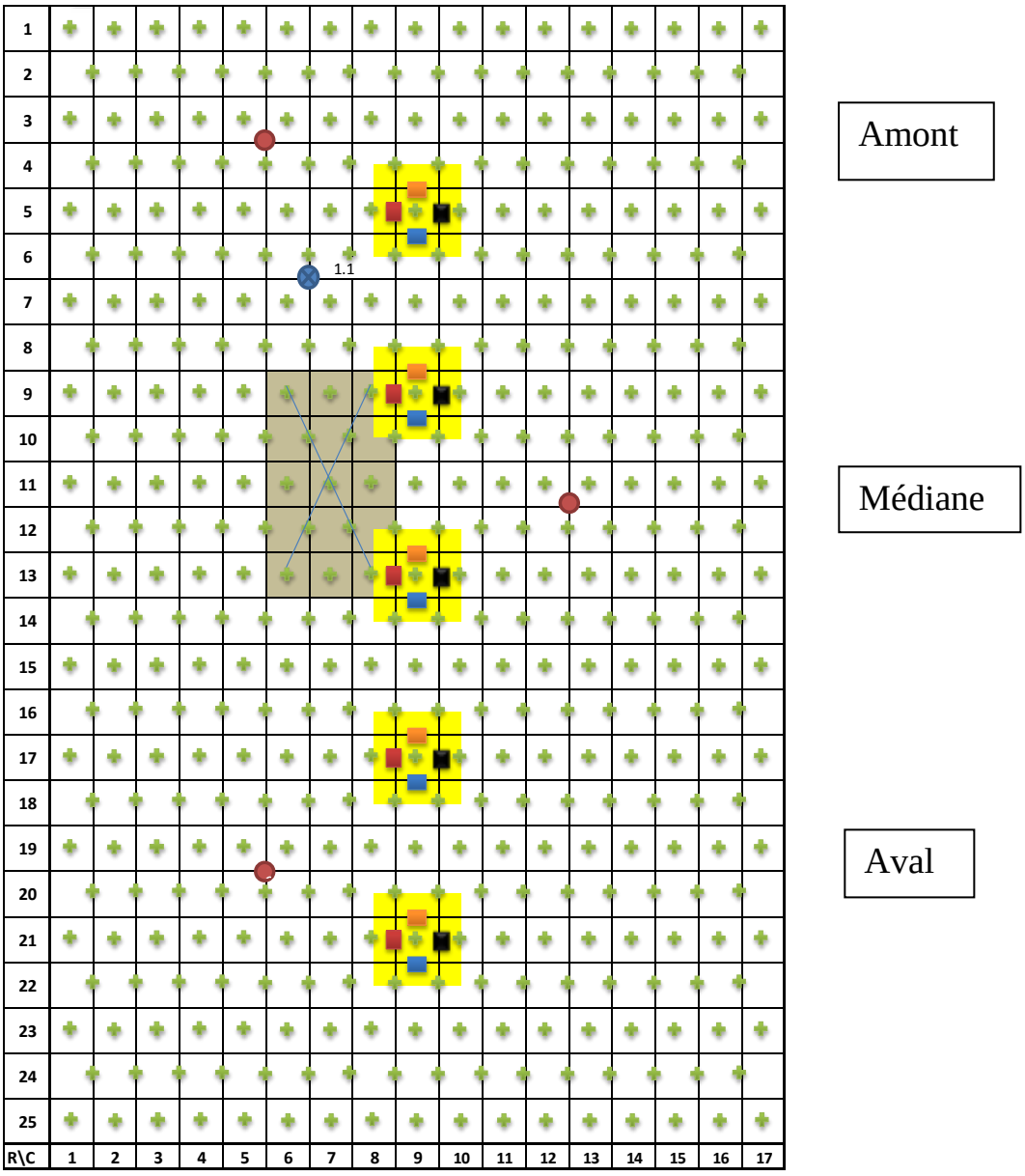


Figure 3: Numérotation des positions dans chacune des parcelles élémentaires.

Après le prélèvement, les échantillons ont été conservés dans des sachets. Pour avoir la masse sèche, on a fait sortir les échantillons des sachets pour les mettre dans des papiers aluminium pour les sécher à l'étuve pendant 24 heures à 105 °C.

Illustration de procédure d'échantillonnage



Photo 5 : Les échantillons dans des sachets et papiers aluminium.

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).

b. Les matériels d'échantillonnage

Les matériels utilisés pour l'échantillonnage sont :

1. La pelle pour décaper et enlever le sol,
2. La pioche pour décaper le sol,
3. Le cylindre métallique pour prélever l'échantillon avec le volume connu,
4. La tarière pour prélever l'échantillon,
5. Le marteau pour enfoncer la tarière,
6. Les sachets pour emballer les échantillons,
7. La mallette (boite) pour le transport des matériels et échantillons,
8. La règle pour mesurer l'horizon,
9. Le couteau pour prélever un volume connu et enlever l'échantillon dans le cylindre,
10. L'étuve pour sécher les échantillons à 105 °C,
11. La balance pour mesurer le poids de l'échantillon.



Photo 6 : Illustration des matériels d'échantillonnage

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).



Photo 7 : L'étuve et la balance utilisées.

Source : Crédit photo ; Théoneste NSANZIMFURA (Burkina Faso, Kamboinsé, 2015).

c. Calcul des paramètres recherchés

Les formules et les procédures utilisées dans le traitement des données sont les suivantes :

- Le volume du cylindre a été déterminé par

$$Le\ volume = \pi * r^2 * h$$

Avec r et h : rayon et hauteur du cylindre de prélèvement

- La densité apparente et la porosité totale sont obtenues par

$$La\ densité\ apparente = \frac{Masse\ sèche}{Volume\ total}$$

$$La\ porosité\ totale = 1 - \frac{Densité\ apparente}{Densité\ réelle}$$

- Le profil hydrique

La détermination du profil hydrique découle du processus suivant :

Etalonnage de la sonde

Les prélèvements d'échantillons dans les profils et les mesures des tubes neutroniques nous ont permis de faire l'étalonnage de la sonde.

- Calcul du ratio $\frac{N}{Ns}$

A l'aide de la sonde, nous disposons des mesures (N) tous les 20 cm au niveau des tubes neutroniques et aussi de la mesure standard (Ns) pour chaque jour de mesure.

N : comptage absolu

N_s : comptage de référence

Le ratio $\frac{N}{Ns}$ entre dans la logique de l'étalonnage de la sonde.

- La droite ou courbe d'étalonnage

Nous tracerons donc la droite d'équation $\Theta = f\left(\frac{N}{Ns}\right)$ grâce à Microsoft Office Excel.

Θ est la teneur en eau obtenue grâce aux échantillons prélevés au niveau des profils.

Détermination de l'humidité volumique H_V

Les coefficients a et b nous ont permis de déterminer l'humidité volumique au niveau de chaque tube neutronique.

On a donc : $H_v(\%) = a*\left(\frac{N}{Ns}\right) + b$

Calcul de profil hydrique du sol

Le profil hydrique du sol est l'allure du graphe d'humidité volumique en fonction de la profondeur.

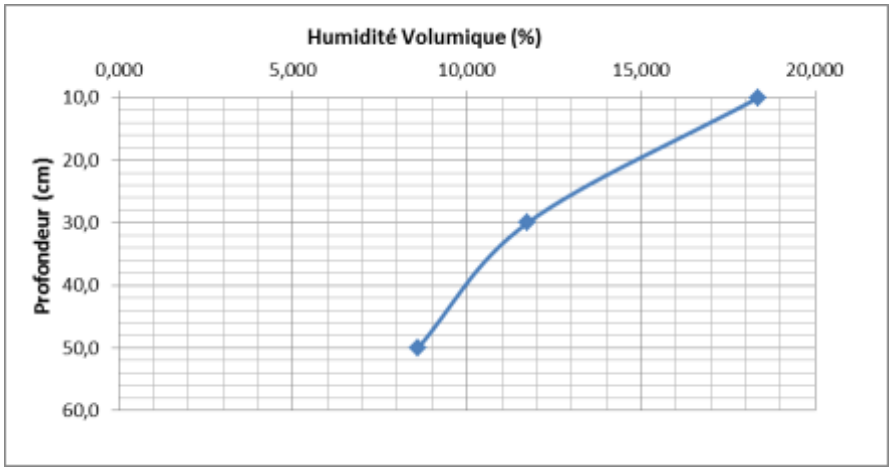


Figure 4 : Illustration du profil hydrique

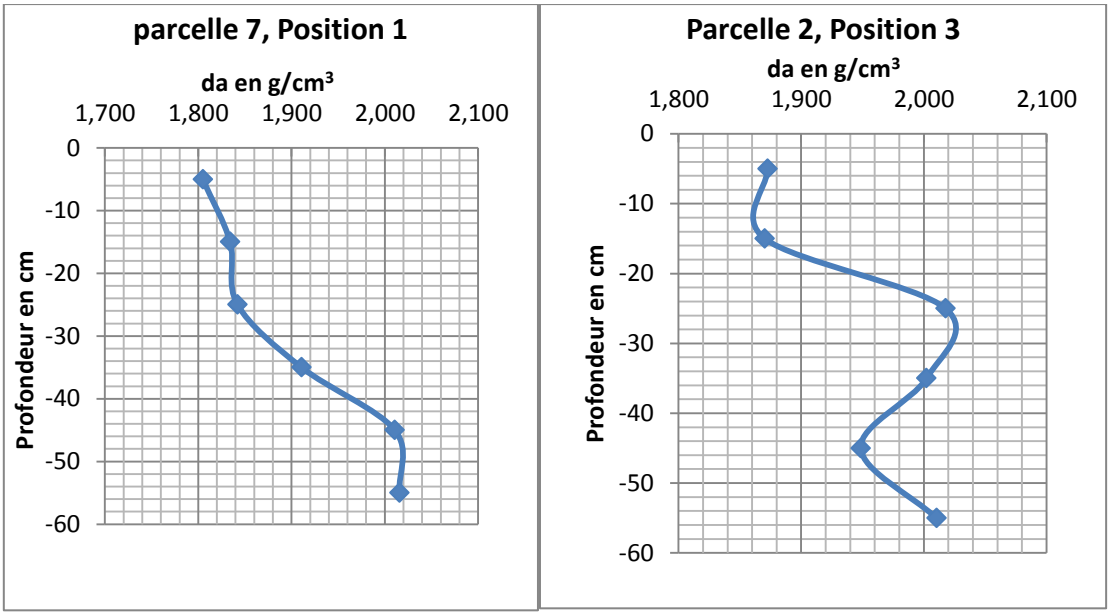
V. RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSION

1. Résultats

En vue d'étudier la densité apparente et la porosité des sols dans le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé, nous avons procédé à des mesures de la densité apparente en utilisant la méthode indirecte. Au total 430 mesures de densité apparente ont été réalisées avec une tarière à cylindre à raison de 18 mesures par parcelle dont six (06) mesures pour chaque point de prélèvement, avec la densité apparente on a calculé la porosité totale et enfin on a établi la relation entre la porosité totale et le profil hydrique.

Les figures 5, 6, et 7 suivantes montrent respectivement les variations de densité apparente, de porosité et de profil hydrique en fonction de la profondeur.

1. Densité apparente



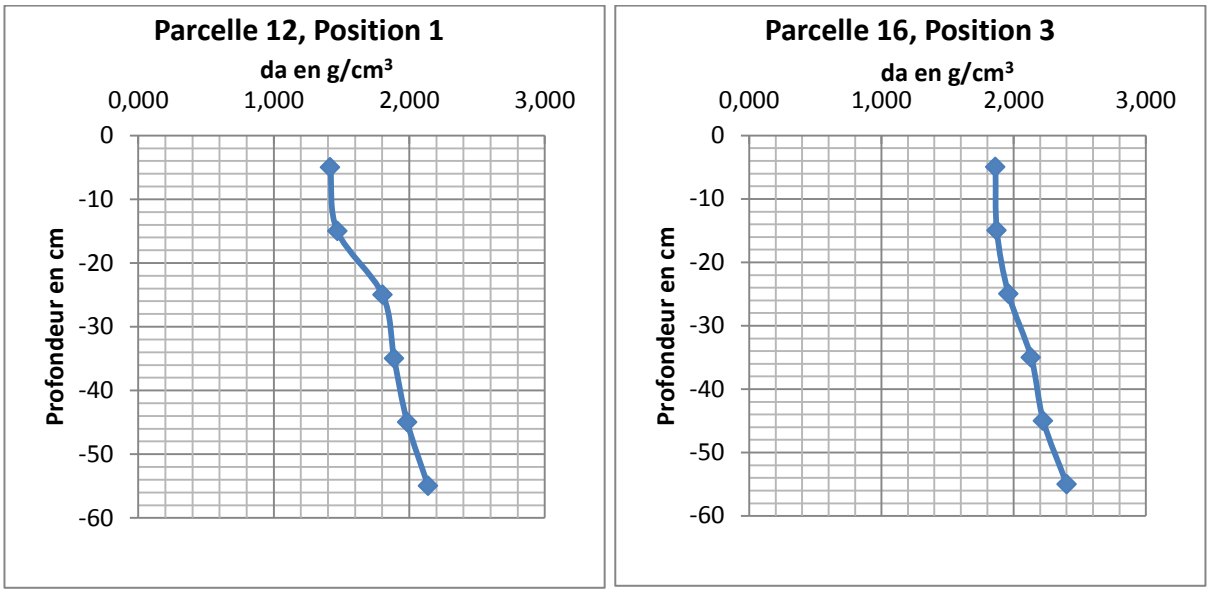
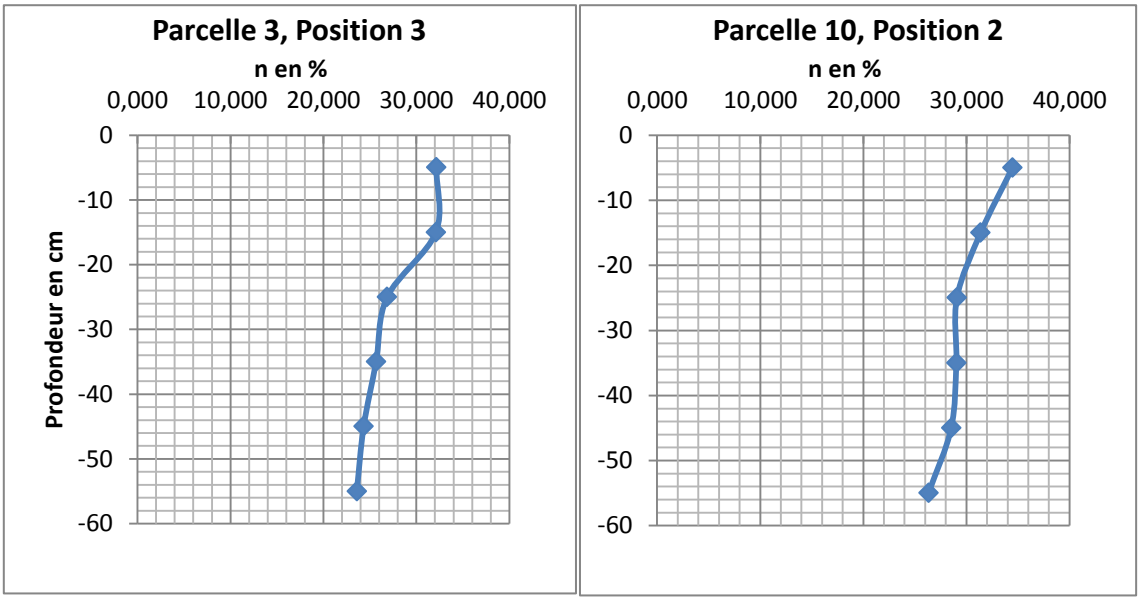


Figure 5: Courbes de variation de la densité apparente en fonction de profondeur (à titre d'exemple; une courbe par bloc)

On constate que la plus faible densité apparente est relevée dans la parcelle 12 du bloc 2 à une profondeur de 0 à 10 centimètre et la plus grande valeur dans la parcelle 16 du bloc 3 à une profondeur de 50 à 60 centimètres avec les valeurs respectives 1,416 g/cm^3 et 2,402 g/cm^3.

2. Porosité



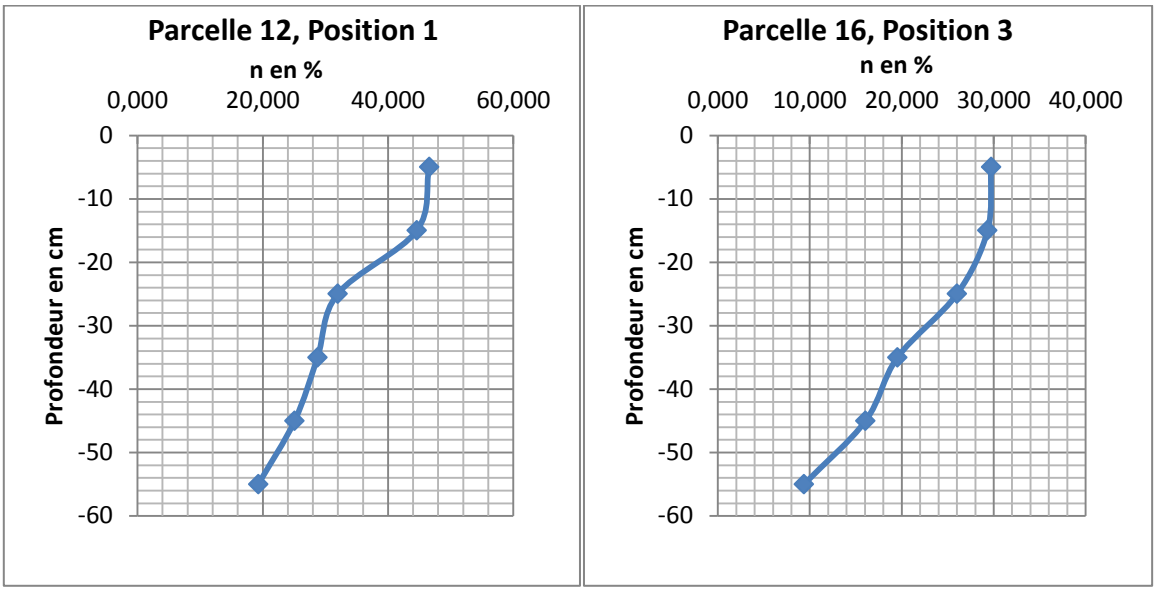


Figure 6: Courbes de variation de la porosité en fonction de profondeur (à titre d'exemple; une courbe par bloc)

La plus faible porosité est relevée dans la parcelle 16 du bloc 3 à une profondeur de 50 à 60 centimètres et la plus grande valeur dans la parcelle 12 du bloc 2 à une profondeur de 0 à 10 centimètres avec les valeurs respectives 9,368 % et 46,553 %. Observons qu'en général la porosité dans les 30 premiers centimètres est au tour de 30 %.

3. Profil Hydrique

En vue de faire la liaison entre le profil hydrique avec la densité apparente et la porosité des sols dans le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé, nous avons collecté des mesures neutroniques effectuées dans la même période que celle des prélèvements gravimétriques en considérant des tubes proches des points de prélèvement. A noter que les parcelles 4, 12, 14, 22 et 26 ne disposent pas de tubes d'accès neutroniques ou d'étalonnage.

Les figures suivantes montrent les variations d'humidité volumique en fonction de la profondeur.

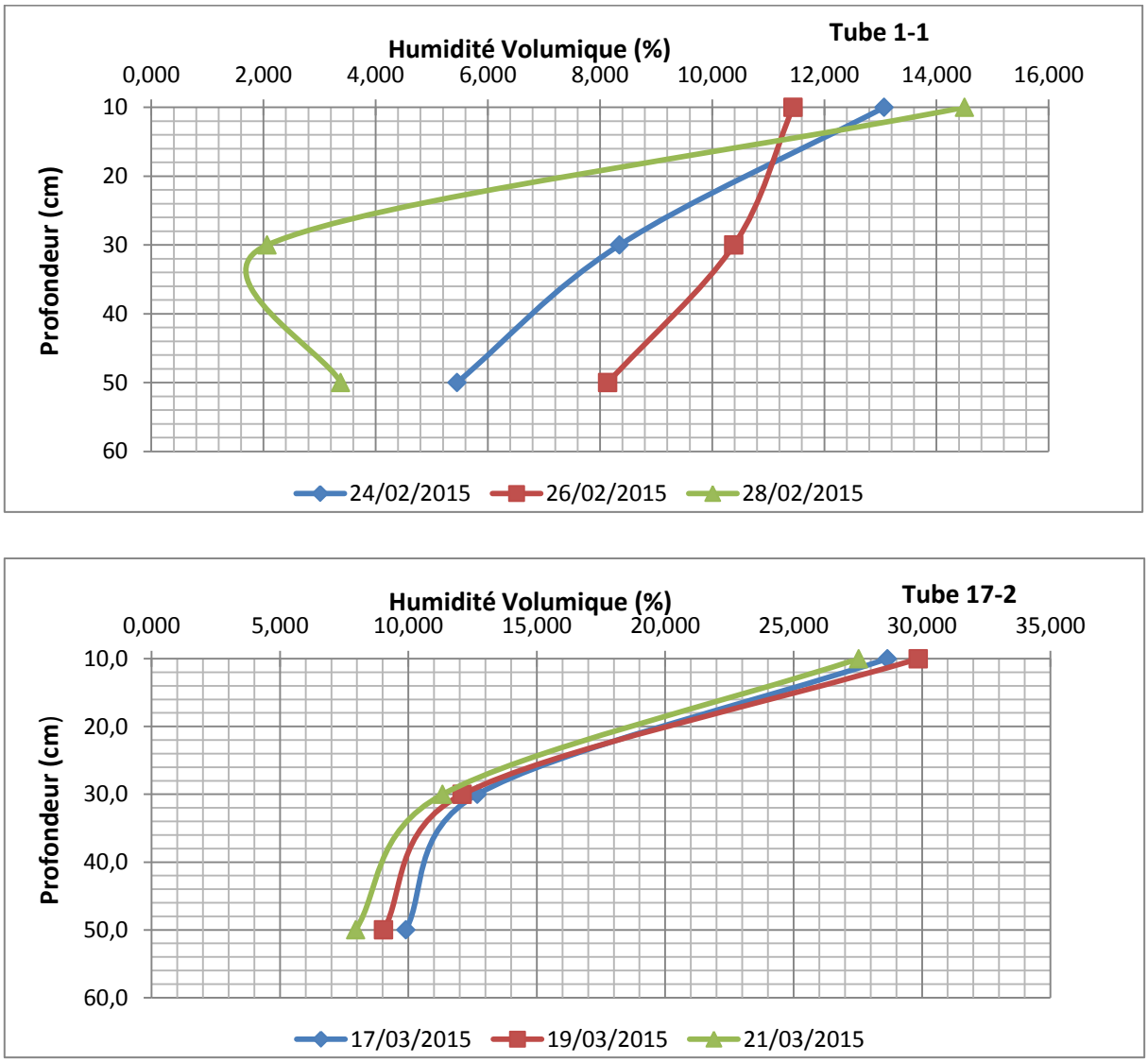


Figure 7: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de la profondeur

La plus faible humidité volumique est relevée dans la parcelle 1 du bloc 1 à une profondeur de 50 à 60 centimètres en date du 28/02/2015 et la plus grande valeur dans la parcelle 17 du bloc 3 à une profondeur de 0 à 10 centimètres en date du 19/03/2015 avec les valeurs respectives 3,378 % et 29,864 %.

2. Analyses et Discussion

a. Étude de la densité apparente et de la porosité.

Tableau 1: Le récapitulatif de la densité apparente et de la porosité du sol du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé (pour quelques parcelles).

	Parcelle 1						Parcelle 9					
Position	**1**		**2**		**3**		**1**		**2**		**3**	
	da [g/cm3]	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
Minimum	1,838	30,632	1,717	35,195	1,707	35,579	1,852	30,121	1,674	36,843	1,774	33,057
Maximum	2,304	13,070	2,093	21,026	1,964	25,893	2,099	20,784	2,078	21,576	2,080	21,503
	Parcelle 2						**Parcelle 3**					
Position	**1**		**2**		**3**		**1**		**2**		**3**	
	da [g/cm3]	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
Minimum	1,848	30,282	1,905	28,126	1,870	29,421	1,738	34,422	1,703	35,740	1,798	32,146
Maximum	1,952	26,323	2,022	23,694	2,018	23,859	1,859	29,856	1,964	25,896	2,025	23,586
	Parcelle 4						**Parcelle 5**					
Position	**1**		**2**		**3**		**1**		**2**		**3**	
	da [g/cm3]	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
Minimum	1,833	30,828	1,695	36,025	1,638	38,196	1,829	30,982	1,867	29,560	1,755	33,780
Maximum	1,956	26,200	1,998	24,605	1,965	25,862	2,041	22,971	2,099	20,804	1,972	25,589
	Parcelle 6						**Parcelle 7**					
Position	**1**		**2**		**3**		**1**		**2**		**3**	
	da [g/cm3]	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
Minimum	1,778	32,915	1,679	36,647	1,828	31,036	1,805	31,893	1,811	31,662	1,854	30,029
Maximum	2,036	23,187	1,986	25,055	1,999	24,551	2,016	23,936	1,999	24,551	2,016	23,936
	Parcelle 11						**Parcelle 12**					
Position	**1**		**2**		**3**		**1**		**2**		**3**	
	da [g/cm3]	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
Minimum	1,693	36,113	1,693	36,125	1,704	35,702	1,416	46,553	1,751	33,911	1,790	32,450
Maximum	2,003	24,405	2,199	17,033	1,966	25,812	2,139	19,278	2,235	15,645	2,161	18,455

Les valeurs de densité apparente au niveau des parcelles ne s'éloignent pas tellement les unes des autres, cela s'explique par le fait qu'on a quasiment le même sol dans tout le site mais notre sol est encore dense. On trouve les valeurs très rapprochées et faibles surtout sur les points de prélèvements se trouvant aux alentours des *P. reticulatum* (référez-vous aux points de prélèvement en couleur verte).

Pour les valeurs de porosité, il y a un léger éloignement de valeurs les unes des autres, cela s'explique par des valeurs importantes à la surface du sol (0-20 cm) et des faibles valeurs en profondeur du sol.

D'après Mermound (2010), on a les valeurs indicatives de la porosité totale des sols meubles (à labourer) :

- ✓ Sols argileux et silteux : 40-60%
- ✓ Sables moyens : 40-50%
- ✓ Sables fins : 35-40%
- ✓ Sables grossiers : 25-35%
- ✓ Graviers : 20-30%
- ✓ Sols tourbeux : 80-85%

On observe qu'en surface (0-20 cm) pour la plupart des parcelles, la porosité totale est autour de 30 % ; ce qui correspond à une granulométrie de sable fins et grossiers, en profondeur (30-60 cm), elle est inférieure à 30 %, qui correspond à de sable grossiers et aux graviers.

Ce qui est conforme à la nature du sol sur le site (selon la classification française) dont un horizon, 0-20 cm, constitué de la terre arable de couleur grisâtre ; un horizon, 20-40 cm, fait d'un mélange de terre arable et de latérite et un horizon inférieur à 40 cm, formé d'une cuirasse latéritique de forte densité.

Une valeur élevée de densité apparente signifie que les vides sont réduits et que les particules sont fortement compactées. Il en résulte des difficultés de circulation de l'eau et de l'air (et donc une mauvaise aération du sol), un ralentissement des processus d'infiltration et de drainage, ainsi que des difficultés de croissance des racines et d'émergence des semis (Mermound, 2010).

La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du matériau et indirectement, la porosité totale. Lorsqu'elle est élevée, le sol ne contient pas des pores nécessaires à la croissance des racines, les capacités en eau sont réduites et la circulation des fluides ralentie (drainage et échange gazeux) (Alongo et Kambele, 2013).

b. L'évolution spatiale de la densité apparente.

On remarque en général que la densité apparente augmente avec la profondeur, plus on va en profondeur plus le sol devient dense jusqu'à une valeur exceptionnelle de 2,402 g/cm^3.
Par contre pour la porosité, plus on descend en profondeur plus les valeurs diminuent jusqu'à 9,368 %. Cela nous montre la présence plus importante de volume des vides (aux environs de 30 %) à la surface qu'en profondeur du sol. Quelques exceptions sont dues à l'hétérogénéité du sol (pour les parcelles 2, 3, 4, 9, 14, et 23 dans certains points de prélèvement).

L'analyse utilisant les paramètres statistiques en fonction des pratiques culturales va nous aider à bien interpréter nos données. Ces paramètres sont la moyenne et l'écart-type.

1. **La moyenne:**

La moyenne est une mesure statistique caractérisant les éléments d'un ensemble de quantités : elle exprime la grandeur qu'aurait chacun des membres de l'ensemble s'ils étaient tous identiques sans changer la dimension globale de l'ensemble.
Le tableau suivant montre la moyenne de la densité apparente et de la porosité des parcelles du site expérimental Crop-News de Kamboinsé à chaque profondeur.

Tableau 2 : La moyenne de la densité apparente et de la porosité de chaque parcelle à chaque profondeur

		Parcelle 1		Parcelle 2		Parcelle 3		Parcelle 4		Parcelle 5		Parcelle 6	
Bloc I	Profondeur [cm]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]
	0-10	1,754	33,802	1,875	29,247	1,757	33,703	1,740	34,354	1,817	31,440	1,761	33,533
	10-20	1,786	32,608	1,897	28,431	1,766	33,348	1,771	33,170	1,845	30,371	1,800	32,076
	20-30	1,826	31,091	1,970	25,668	1,845	30,389	1,825	31,138	1,855	30,016	1,874	29,269
	30-40	1,950	26,399	1,970	25,665	1,869	29,467	1,858	29,868	1,881	29,004	1,902	28,237
	40-50	2,037	23,120	1,977	25,385	1,918	27,604	1,927	27,269	1,950	26,433	1,938	26,850
	50-60	2,120	19,996	1,991	24,860	1,949	26,446	1,973	25,556	2,037	23,121	2,007	24,264
		Parcelle 7		Parcelle 8		Parcelle 9		Parcelle 10		Parcelle 11		Parcelle 12	
Bloc II	Profondeur [cm]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]
	0-10	1,823	31,194	1,875	29,248	1,800	32,079	1,761	33,535	1,697	35,980	1,653	37,638
	10-20	1,859	29,839	1,876	29,200	1,816	31,455	1,808	31,780	1,775	33,013	1,705	35,670
	20-30	1,904	28,155	1,919	27,598	1,863	29,708	1,855	30,008	1,847	30,317	1,854	30,049
	30-40	1,952	26,354	1,999	24,559	1,901	28,280	1,895	28,490	1,975	25,483	1,909	27,968
	40-50	1,989	24,953	2,015	23,978	1,964	25,905	1,939	26,813	2,009	24,204	2,012	24,082
	50-60	1,882	28,991	2,114	20,240	2,086	21,288	2,025	23,595	2,056	22,417	2,178	17,793
		Parcelle 13		Parcelle 14		Parcelle 15		Parcelle 16		Parcelle 17		Parcelle 18	
Bloc III	Profondeur [cm]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]
	0-10	1,755	33,792	1,855	30,009	1,806	31,865	1,737	34,451	1,860	29,824	1,896	28,438
	10-20	1,862	29,722	1,807	31,806	1,880	29,053	1,747	34,067	1,773	33,080	1,866	29,569
	20-30	1,973	25,530	1,849	30,221	1,996	24,681	1,855	30,018	1,901	28,274	1,921	27,497
	30-40	2,040	23,001	1,938	26,882	2,026	23,531	2,050	22,632	1,918	27,617	1,951	26,380
	40-50	2,050	22,646	2,056	22,403	2,076	21,656	2,112	20,317	2,064	22,103	2,131	19,572
	50-60	2,121	19,960	2,085	21,305	2,174	17,946	2,190	17,361	2,210	16,602	2,263	14,606

		Parcelle 19		Parcelle 20		Parcelle 21		Parcelle 22		Parcelle 23		Parcelle 24	
Bloc IV	Profondeur [cm]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]	da [g/cm3]	n [%]
	0-10	1,822	31,250	1,873	29,329	1,843	30,446	1,800	32,090	1,728	34,806	1,769	33,228
	10-20	1,847	30,298	1,906	28,084	1,857	29,938	1,826	31,091	1,769	33,233	1,788	32,537
	20-30	2,050	22,632	1,918	27,633	1,906	28,073	1,937	26,916	1,897	28,433	1,833	30,814
	30-40	2,217	16,345	2,054	22,483	1,998	24,599	2,113	20,246	1,933	27,071	1,889	28,727
	40-50	2,195	17,167	2,066	22,055	1,968	25,731	Roche		2,034	23,258	1,922	27,483
	50-60	2,230	15,862	roche		2,064	22,128			1,997	24,651	2,054	22,500

		Parcelle 26	
Annexe	Profondeur [cm]	da [g/cm3]	n [%]
	0-10	1,773	33,111
	10-20	1,851	30,135
	20-30	1,972	25,594
	30-40	2,143	19,135
	40-50	2,061	22,241
	50-60	2,178	17,809

i. Evolution spatiale avec la densité des arbustes

La répartition des arbustes dans les parcelles est inéquitable mais à titre expérimental, il y a des parcelles à haute densité HSD (High Shrub Density: 32 arbustes par parcelle soit 2000 arbustes à l'hectare ; nous avons les parcelles 5, 6, 7, 10, 15, 16, 20 et 24), à moyenne densité, MSD (Medium Shrub Density: 18 arbustes par parcelle soit 1000 arbustes à l'hectare ; nous avons les parcelles 4, 12, 14 et 22), à faible densité LSD (High Shrub Density: 11 arbustes par parcelle soit 500 arbustes à l'hectare ; nous avons les parcelles 2, 3, 8, 11, 17, 18, 19 et 21) et sans arbustes, NS (No Shrub: sans abustes ; nous avons les parcelles 1, 9, 13 et 23). C'est avec la haute densité que l'on trouve une parcelle qui présente le plus faible intervalle de variation ; la parcelle 7 qui varie de 1,823 à 1,989 g/cm^3 le long de toute la profondeur (jusqu'à 60cm) pour la densité apparente et de 24,953 à 31,194 % pour la porosité. L'influence des arbustes sur la densité apparente et la porosité n'est pas tout à fait remarquable.

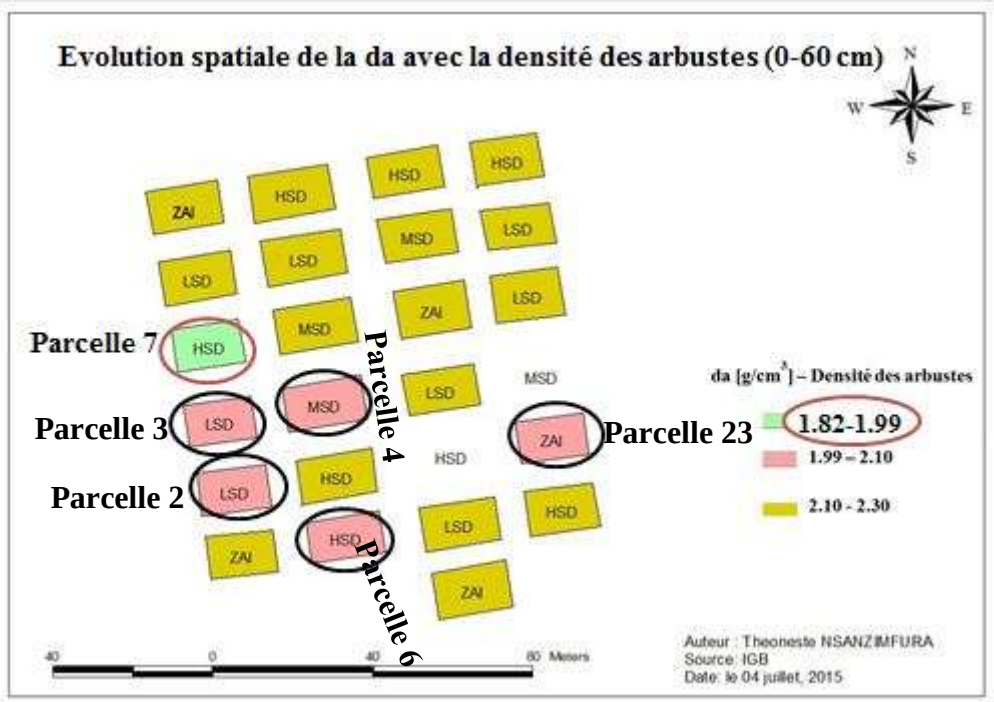


Figure 8 : Evolution de la densité apparente avec la densité des arbustes (0-60 cm)

Source : ArcView GIS.

ii. Evolution spatiale avec le Zaï

Les parcelles de Zaï sans arbuste (1, 9, 13 et 23) ont des densités variant de 1,728 à 1,862 g/cm^3, faibles en surface. Le Zaï est considéré comme technique de conservation des eaux et des sols (Roose et al., 1995). Ce qui est expliqué par le stockage d'eau des Zaï à la surface (de 0 à 20cm), qui rend le sol humide et puis moins dense.

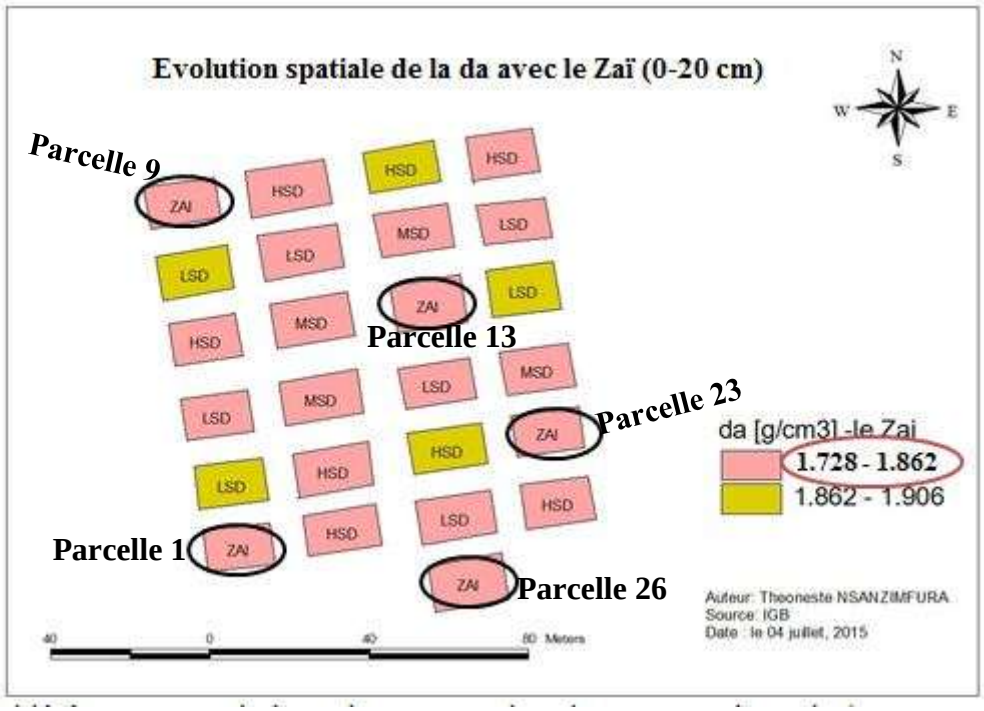


Figure 9 : Evolution de la densité apparente avec le Zaï (0-20 cm)

Source : ArcView GIS.

iii. Evolution spatiale entre les parcelles (inter parcelles)

La parcelle 19 est la plus dense de notre site expérimental avec une densité variant de 1,822 à 2,230 g/cm^3 alors que la plus homogène (identique) est la parcelle 7 présentant un intervalle variant de 1,823 à 1,882 g/cm^3.

Les parcelles 2, 3, 4, 7, et 23 présentent des valeurs de la densité apparente inferieures à 2,000 g/cm^3 pour toutes les profondeurs (jusqu'à 60cm) ; parmi ces cinq (05) parcelles, quatre sont avec des arbustes et dans ces cinq (05), trois (03) sont sous Zaï + *P. reticulatum* (les parcelles 3, 4 et 7).

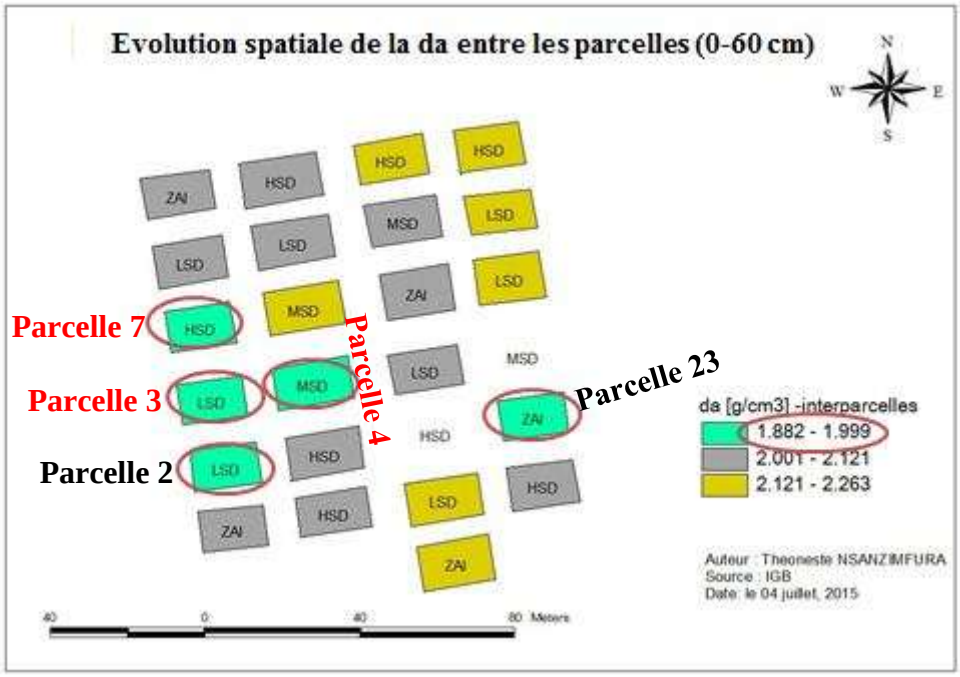


Figure 10 : Evolution de la densité apparente entre les parcelles (0-60 cm)

Source : ArcView GIS.

iv. Evolution spatiale entre les blocs (inter blocs)

En surface (horizon 0-20 cm), les densités apparentes varient dans chaque bloc comme suit : pour le bloc I de 1,740 à 1,897 g/cm^3, pour le bloc II de 1,653 à 1,876 g/cm^3, pour le bloc III de 1,737 à 1,880 g/cm^3 et pour le bloc IV, l'intervalle est de 1,728 à 1,906 g/cm^3. De cette variation on remarque que les blocs II et III ont des parcelles de faibles densités apparentes par rapport aux blocs I et IV. Cela est dû à la nature du sol qui est plus dense dans la partie des blocs I et IV et que c'est dans ces blocs qu'on trouve une valeur élevée de la densité apparente, enfin c'est dans ces blocs que l'on n'a pas pu arriver à 60 cm de profondeur lors de l'échantillonnage.

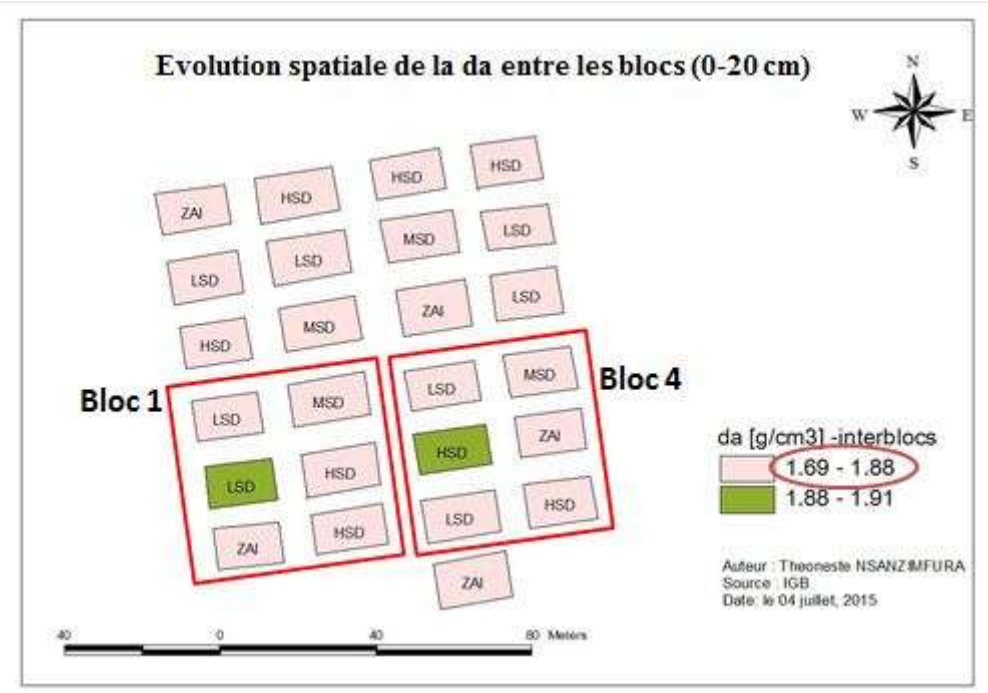


Figure 11 : Evolution de la densité apparente entre les blocs (0-20 cm)

Source : ArcView GIS.

2. **L'écart-type:**

En statistique et en théorie des probabilités, la variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la série statistique ou la variable aléatoire se disperse autour de sa moyenne ou son espérance.

La racine carrée de la variance s'appelle l'écart-type. Il est une notion mathématique définie en probabilités et appliquée à la statistique. Il est une mesure de dispersion de données.

On a donc calculé les écarts-types pour chaque parcelle et chaque profondeur, des trois (03) mesures effectuées.

L'intervalle de confiance

La notion d'intervalle de confiance renvoie au degré de précision d'une moyenne ou d'un pourcentage. On travaille sur un échantillon et l'on souhaite connaître la fiabilité que l'on peut accorder aux valeurs observées par rapport aux valeurs réelles de la population totale.

L'intervalle de 99 % est le plus prudent, l'intervalle de 95 % est le plus répandu, et le niveau de 90 % est rarement utilisé. Nous utilisons l'intervalle de 95 % (plus répandu) qui donne la marge d'erreur (seuil) de 5 %.

Tableau 3: Les parcelles dont l'écart-type est inférieur ou égal à 5,0 % de porosité totale

	Parcelle 2		Parcelle 3		Parcelle 4		Parcelle 5		Parcelle 6	
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
0-10	0,029	1,081	0,036	1,349	0,130	4,896	0,057	2,147	0,076	2,856
10-20	0,039	1,473	0,055	2,072	0,076	2,869	0,033	1,238	0,080	3,003
20-30	0,057	2,142	0,081	3,068	0,101	3,799	0,043	1,606	0,064	2,432
30-40	0,031	1,160	0,088	3,333	0,046	1,721	0,041	1,559	0,068	2,566
40-50	0,039	1,484	0,099	3,739	0,056	2,109	0,037	1,393	0,055	2,078
50-60	0,034	1,267	0,084	3,171	0,022	0,841	0,064	2,396	0,026	0,967
	Parcelle 9		**Parcelle 10**		**Parcelle 11**		**Parcelle 14**		**Parcelle 15**	
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
0-10	0,109	4,132	0,060	2,278	0,006	0,241	0,063	2,382	0,041	1,532
10-20	0,060	2,262	0,017	0,648	0,033	1,231	0,059	2,224	0,083	3,114
20-30	0,051	1,940	0,023	0,886	0,037	1,381	0,098	3,708	0,076	2,855
30-40	0,025	0,925	0,019	0,707	0,130	4,918	0,096	3,611	0,069	2,590
40-50	0,070	2,625	0,053	2,013	0,109	4,109	0,071	2,692	0,058	2,172
50-60	0,012	0,438	0,092	3,465	0,125	4,715	0,055	2,082	0,057	2,158
	Parcelle 17		**Parcelle 18**		**Parcelle 22**					
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**				
0-10	0,088	3,338	0,056	2,121	0,061	2,305				
10-20	0,076	2,864	0,114	4,303	0,045	1,714				
20-30	0,074	2,786	0,061	2,291	0,126	4,739				
30-40	0,069	2,607	0,059	2,210	0,117	4,418				
40-50	0,048	1,799	0,047	1,770	roche					
50-60	0,079	2,998	0,100	3,761						

Vu leur écart-type, nous remarquons que les parcelles 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18 et 22 ont des valeurs regroupées autour de leurs moyenne car ils ont un faible écart-type inférieur ou égal à 0,130 g/cm^3 pour la densité apparente et à 5,000 % pour la porosité totale. Pour d'autres parcelles qui ont des valeurs supérieures, veillez les trouver dans l'annexe.

On observe que la majorité de ces parcelles citées précédemment sont celles où il y a des arbustes surtout HSD, parmi les huit (08) parcelles de HSD, on trouve les quatre (04) qui sont 5, 6, 10 et 15, parmi les quatre (04) parcelles de MSD, on trouve les deux (02) qui sont 4 et 22, parmi les huit (08) parcelles de LSD, on trouve les 5 qui sont 2, 3, 11, 17 et 18. En dernier pour NS, parmi les quatre (04) parcelles, on trouve une (01) qui est 9 et dans cette parcelle il y a Zaï.

On observe encore que le bloc quatre (04) n'a pas de parcelle qui sont identiques à leur moyenne. Cela est dû à la nature du sol dans le bloc qui est hétérogène (hétérogénéité du sol).

c. Relation entre la porosité totale et le profil hydrique.

La courbe suivante montre la variation du profil hydrique en fonction de la profondeur, faisons une liaison entre cette variation et les deux propriétés hydriques du sol.

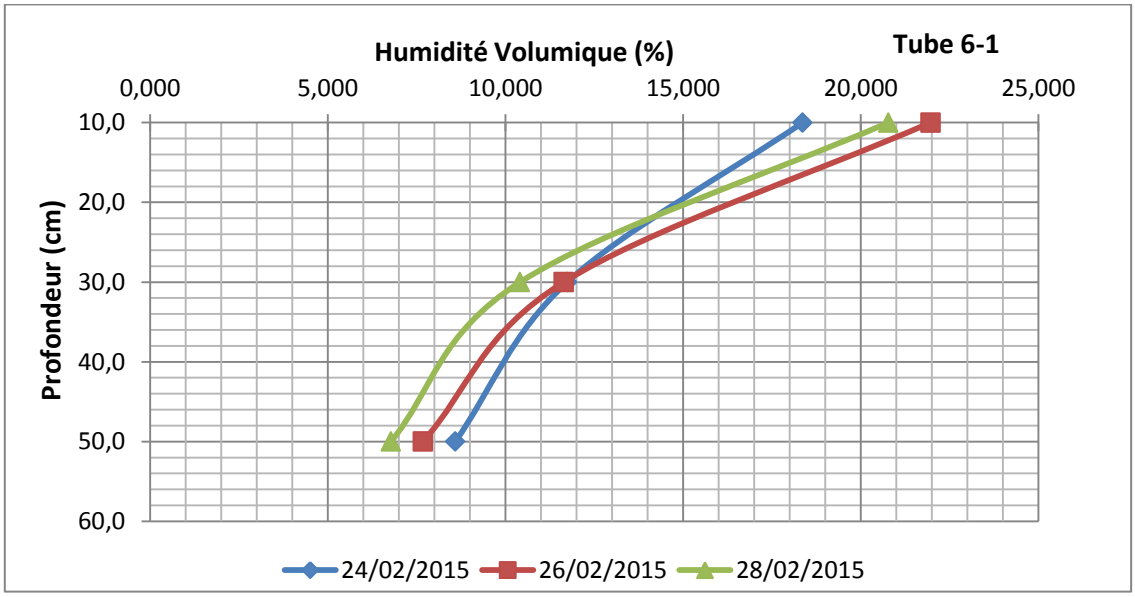


Figure 12 : Courbe de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (courbe représentative des tubes rapprochés des arbustes)

On remarque, sur la figure ci-dessus, que les valeurs d'humidité volumique décroissent en fonction de la profondeur. Cette décroissance s'observe sur les tubes très rapprochés du *P. reticulatum* avec les valeurs élevées (variant de 10 à 29,867 %) à la surface du sol (0 à 20 cm) qui continuent à décroitre jusqu'à une faible valeur de 3,669 % (à la profondeur de 60 cm). Cela est dû à la présence de ces plantes qui emmagasinent l'eau et aussi à la présence des macroporosités à la surface du sol.

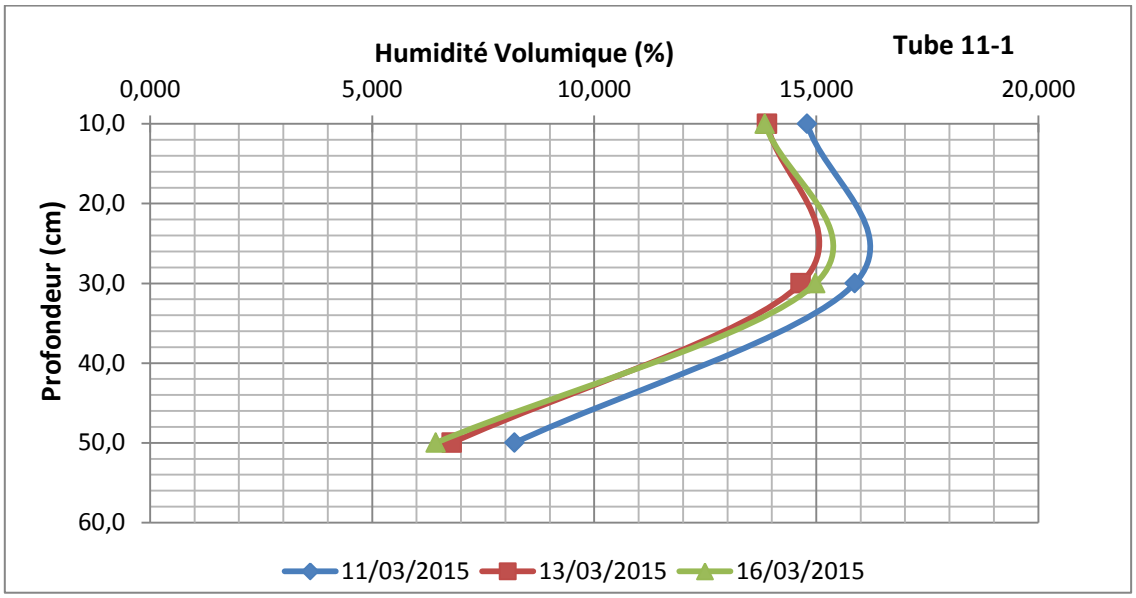


Figure 13 : Courbe de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (courbe représentative des tubes éloignés des arbustes)

Nous remarquons sur cette figure que sur les tubes éloignés de *P. reticulatum* ou sur les tubes se trouvant dans les parcelles où il n'y en a pas, on observe des valeurs faibles d'humidité volumique (variant de 6,779 à 14,796 %) à la surface du sol (0 à 20 cm). Cela est dû aux effets du rayonnement solaire sur le sol (nous étions dans la saison sèche) au niveau de la surface et à l'absence de *P. reticulatum* dans ces parcelles (parcelle 2, 5, 9, 10, 11,13 et 23).

La décroissance continue jusqu'à une faible valeur de 3,378 % (à la profondeur de 60 cm).

La présence des macroporosités et la faible densité du sol en surface, expliquent l'humidité volumique importante à ce niveau (dans les premiers vingt (20) centimètres).

Ce qui corrobore les travaux de (Ganaba, 1994; Diack et al., 2000) qui ont trouvé que le *P. reticulatum* permet de conserver l'humidité dans le sol.

CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude était d'étudier la densité apparente et la porosité totale du sol, à différentes profondeurs de 0 à 60 cm, en relation avec les pratiques culturales sur les parcelles expérimentales de Kamboinsé.

Les résultats montrent que :

- la densité apparente augmente avec la profondeur contrairement à la porosité totale qui diminue avec la profondeur ;
- l'existence de volume de vides important sur les premiers centimètres du sol (0 à 20 cm) et d'une diminution de celui-ci en profondeur (au-delà de 40 cm) ;
- les transferts d'eau en surface sont favorisés par l'existence de ce volume de vides qui a tendance à créer des chemins préférentiels d'écoulement ;
- les parcelles avec *P. reticulatum* sont caractérisées par des humidités importantes en surface (0-20 cm) et une faible variation de la densité apparente et de la porosité en surface (0-20 cm) sous les parcelles à Zaï.

La démarche adoptée pour l'expérimentation présente des inconvénients qu'il faudrait corriger par l'exploration d'autres pistes.

RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Il s'avère nécessaire de prolonger cette étude en vue :

- D'utiliser d'autres méthodes pour la détermination de la densité apparente (comme, la méthode au sable et gammamétrie) et pour la porosité (la méthode directe: au laboratoire, la méthode in situ : diagraphies neutron et mesure de la résistivité du terrain),
- D'explorer d'autres points de prélèvement aussi bien en saison sèche qu'en saison humide pour mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle de ces deux paramètres,
- De faire une étude (cherche) des pratiques culturales (ou plantes) influençant la densité apparente et la porosité du sol.

BIBLIOGRAPHIE

1. Alongo, S. & Kambele, F., 2013. Évolution de la densité apparente et du rapport c/n du sol sous les variétés exotiques et locale de manioc dans les conditions naturelles de Kisangani (R.D.Congo). *Annales de l'Institut Facultaires des sciences agronomiques de Yangambi,* Volume 1, pp. 197-214.

2. Ambouta , J., Tidjani D. , D. & Bielders , C., 2009. Réhabilitation d'une vive par fixation mécanique :flux éoliens,fertilité du sol et biodiversité des herbacées. *Géo-Eco-Trop,* Issue 33, pp. 81-98.

3. Bamba, K., 1985. *Systèmes aériens et racinaires de quelques essences spontanées et exotiques dans la region de Saponé. Mémoire de fin d'étude IDR option Eauxet Forêts..* Ouagadougou: Université de Ouagadougou,pp.46.

4. Bationo B., A., Yelemou, B., Yameogo, G. & Millogo-Rasolodimby, J., 2007. Gestion traditionnelle et usages de Piliostigma reticulatum sur le Plateau central du Burkina Faso. *Bois et forêts des tropiques,* Issue 291, pp. 55-66.

5. Bir, S., 2012. *Mémoire pour l'obtention de magistere en géotechnique et environnement - Ecoulements au travers les milieux poreux. Aproche stochastique.* Tizi ouzou, Algerie: Université Mouloud Manneri,pp.216.

6. Blake, R. & Hartage, K., 1986. Bulk density. Methods of soils analysis. *Soil science,* 1(2), pp. 363-375.

7. Blondel, T., 2001. *INERIS: Projet Transpol - Programme 2000 Volet 2, Paramètres et paramétrage des modèles en écoulement et en transport de polluants..* s.l.:Cabinet - conseil Blondel,pp.120.

8. Bruand , A. et al., 1993. Analysis of porosity in a tilled « crusting soil » in Zimbabwe. *Geoderma,* Volume 59, pp. 235-248.

9. BUNASOL, 2000. *Rapport d'investigation -province du KADIOGO.,* Ouagadougou: Bureau National des sols (BUNASOL),pp.21.

10. Calvert, R., 2003. *Le Sol-Propriétés et fonctions.* Tome 1 éd. s.l.:France Agricole,pp.467.

11. Chawel, A., 1977. *Recherches sur la transformation des sols ferralitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance..* Coll. Trav. éd. Paris: Université de Strasbourg,pp.17.

12. Chretien, J., Pedro, G. & Meunier, D., 1987. Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques Cas des terrasses alluviales de la Saône. XXIII(1), pp. 43-54.

13. Dan, N., 2002. *Valorisation des eaux de ruissellement en zones arides et semiarides méditerranéennes et sahéliennes par les techniques traditionnelles d'aménagement des sols..*

Thèse 3e cycle éd. Niamey & Tunis: Université Abdou Moumouni de Niamey et Université de Tuni,pp.32.

14. Demolon, A., 1966. *Principes d'agronomie- Dynamique du Sol.* 5ieme éd. Paris: Dunod,pp.34.
15. Diack, M. et al., 2000. Decomposition of a native shrub, Piliostigma reticulatum, litter in soils of semiarid Senegal.. *Arid Soil Research and Rehabilitation.,* 3(14), pp. 205-218.
16. Ganaba, S., 1994. *Rôle des structures racinaires dans la dynamique du peuplement ligneux de larégion de la mare d'Oursi (Burkina Faso) entre 1980 et 1992. Thèse de doctorat 3ième cycle.* Ouagadougou: Université de Ouagadougou,pp.18.
17. Henin, S., Monnier , G. & Gras, R., 1969. Le profil cultural.. *Masson,* Volume 2nd edition, p. 332.
18. INERA, 1995. *Etude des zones d'implantation des stations agricoles.* Ouagadougou: INERA,pp.63.
19. Jenny, H., 1964. *Etudes agro-pédologiques des stations de Saria et Farako-Bâ (Haute-Volta),* Ouagadougou: IRAT,pp.27.
20. Lahlou, S. et al., 2005. Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine. *Etude et Gestion des Sols,* XII(1), pp. 69-76.
21. Lahmar, R., Bationo, B., Dan Lamso, N. & Guero, Y., 2011. Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones.. *Building on traditional local practices for soil restoration.,* 20(1016), p. 10.
22. Maertens, C., 1964. La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement.. *Ann. Agron.,* 5(15), pp. 539-554.
23. McBride, R., Martin, H. & Kennedy, H., 1989. *La compaction du sol. Fiche technique,Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Ontario, Canada, pp. 79.*
24. Mermound, A., 2010. *Cours de physique du sol..* Ouagadougou & Lausane: 2iE & Ecole polytechnique fédérale de lausane, pp.18.
25. Ministère des Richesses naturelles & Centre de ressources pour propriétaires fonciers., 1994. *Un bon moyen de lutter contre la végétation concurrente..* Ontario: ministère des Richesses naturelles,Ontario, Canada, pp.194.
26. Ouattara, K., Fortier , M., Lompo, F. & Assa, A., 1998. Modifications de la porosité du sol après trente-trois années de labour d'enfouissement de fumier au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures.,* Volume 7, pp. 9-14.
27. Pallo , F. & Thiombiano, L., 1989. Les sols ferrugineux tropicaux lessives à concrétions du Burkina Faso: Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole.. pp. 307-327.
28. Peron, Y., 1975. Atlas de la Haute-Volta.. *Les Atlas Jeune-Afrique, pp.67.*

29. Roose, E., Guenat, C. & Kabore, V., 1995. *Le zaï, une technique traditionnelle africaine de réhabilitation des terres dégradées de la région soudano-sahélienne (Burkina Faso).* pp. 249-265. éd. Paris: Le Floc'h John Libbey Eurotext.

30. Traoré, M., 2000. *Etude de la phénologie, de la régénération naturelle, et des usages de Piliostigma Reticulatum.* Bobo Dioulasso: Université polytechnique de Bobo Dioulasso/Institut du développement rural, pp.95.

31. Yogo , G. & Assa, A., 1986. Modifications structurales de deux sols ferralitiques du nord-ouest de la Côte-d'Ivoire sous l'effet du piétinement par l'homme. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.,* XXII(1), pp. 31-41..

32. Yoro, G., 1983. Contribution à l'étude de caractérisation de la structure. Identification et évolution des paramètres structuraux de deux types de sols du nord-ouest de la Côte-d'Ivoire.. *Incidences agronomiques,* Volume Thèse, doct. Ingénieur, université d'Abidjan, p. 279.

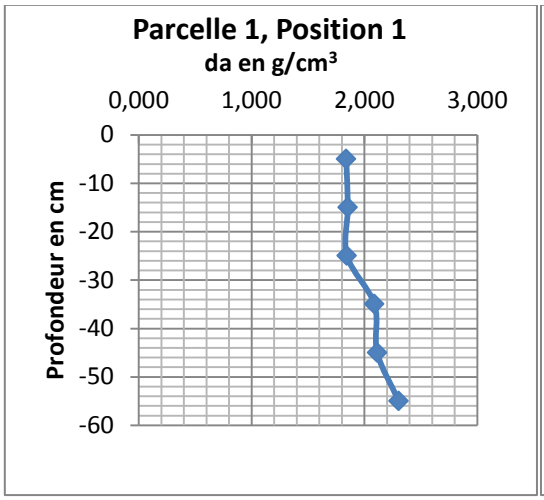
33. Zerbo, L., 1995. *Caractérisation des sols des stations de recherches agricoles de l'INERA..* Ouagadougou: INERA, pp.43.

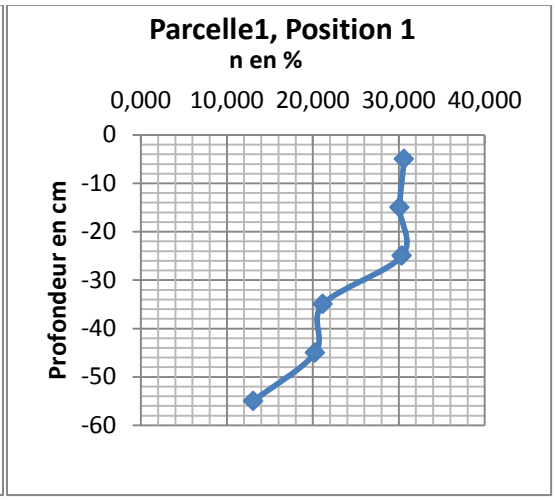
ANNEXES

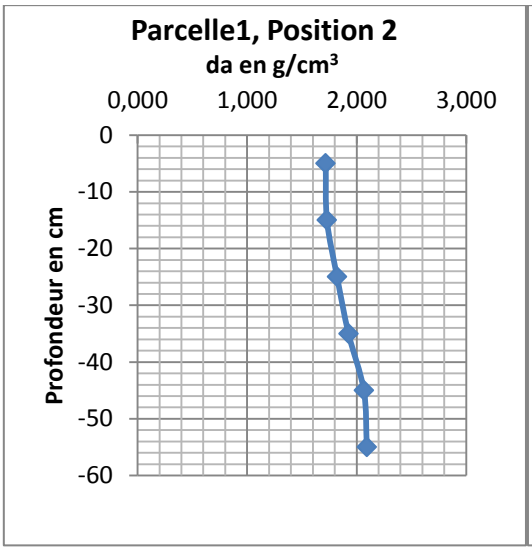
Sommaire

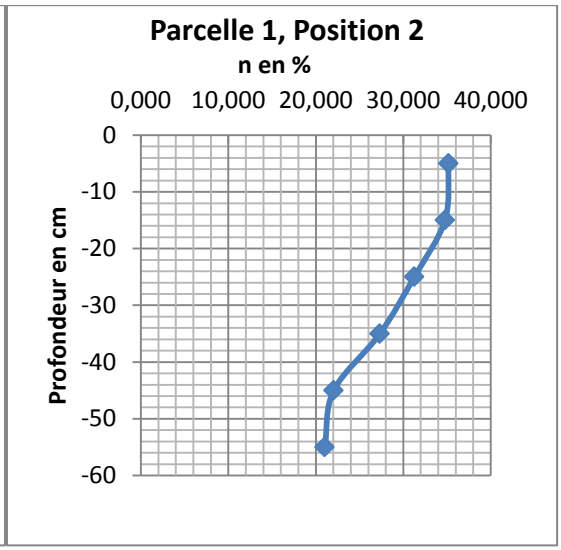
Annexe 1: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (a)..... B
Annexe 2: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (b) C
Annexe 3: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (c)..... D
Annexe 4: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (d) .....E
Annexe 5: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (e).....F
Annexe 6: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (f) ..... G
Annexe 7: courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (g) ..... H
Annexe 8: Courbes de variation de la densité et de la porosité en fonction de profondeur (h) ..I
Annexe 9: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (i) .....J
Annexe 10: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (j) ..... K
Annexe 11: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (k) L
Annexe 12: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (l) .....M
Annexe 13: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (m) ..... N
Annexe 14: Courbes d'étalonnage de la sonde à neutron ..... O
Annexe 15: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (a).....P
Annexe 16: Courbes de variation du profil hydrique en fonction profondeur (b) ..... Q
Annexe 17: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (c)..... R
Annexe 18 : Parcelles dont l'écart-type est supérieur à 5,0 % de porosité totale (écartées à la moyenne).....S

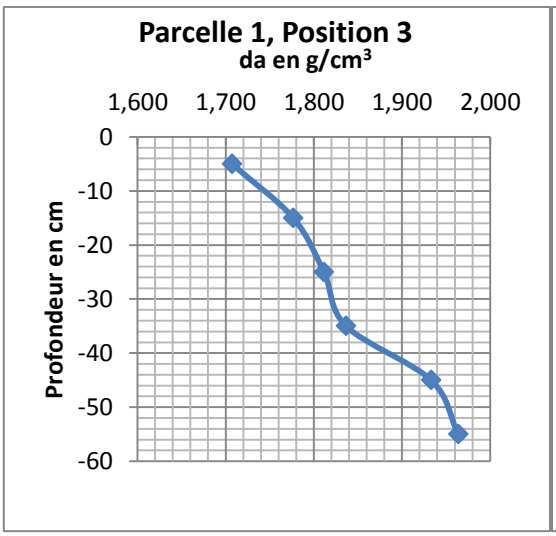
Annexe 1: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (a)

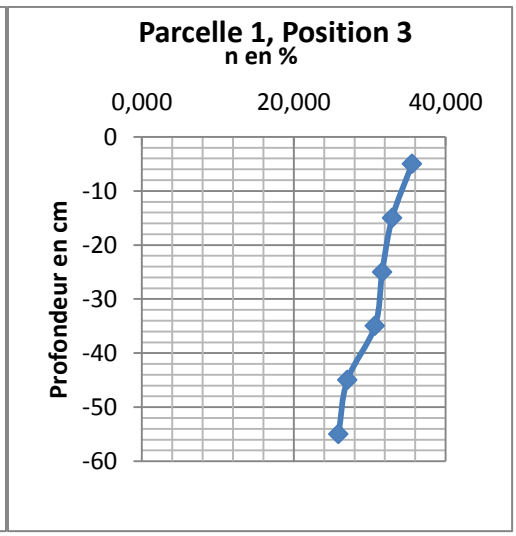




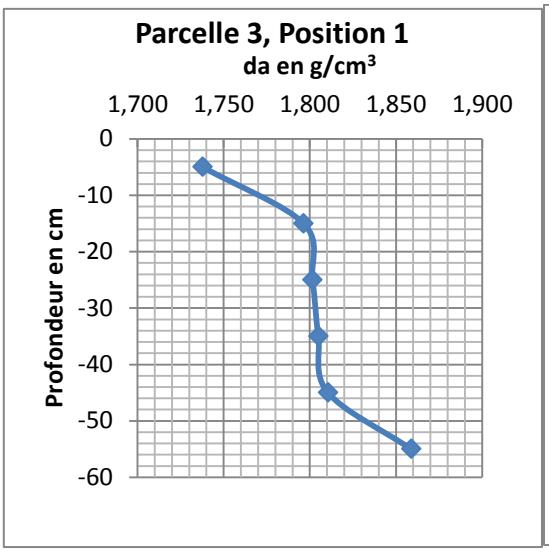


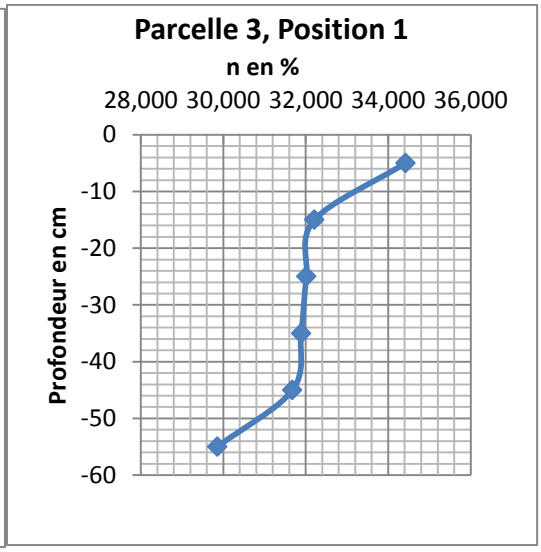


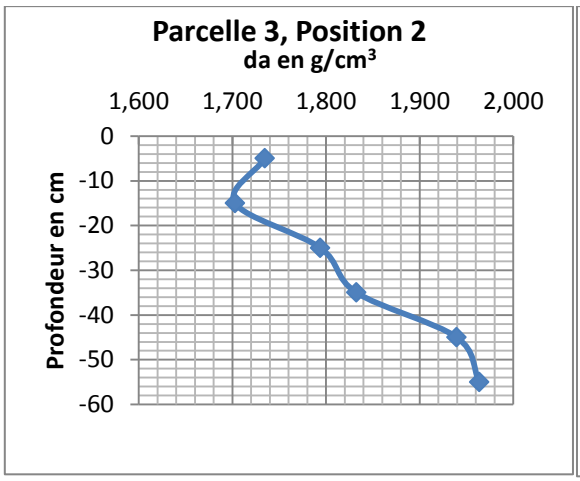


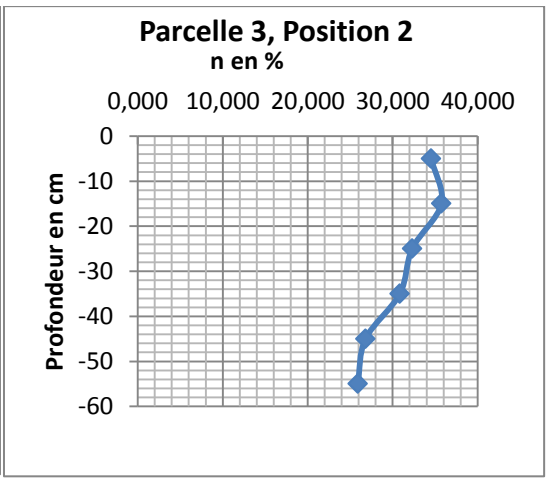


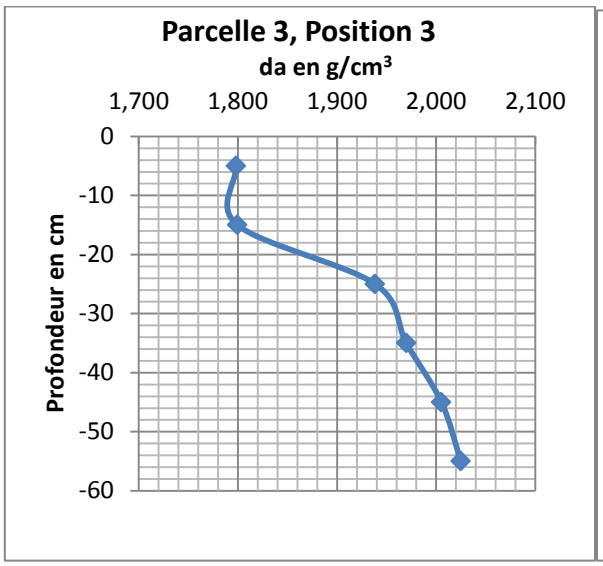
Annexe 2: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (b)

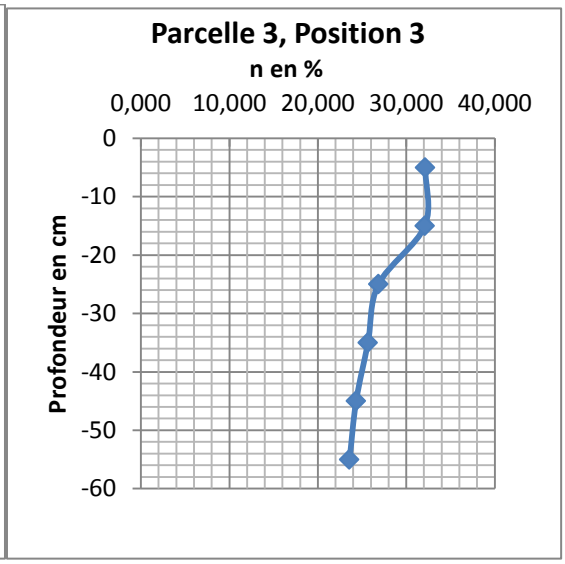




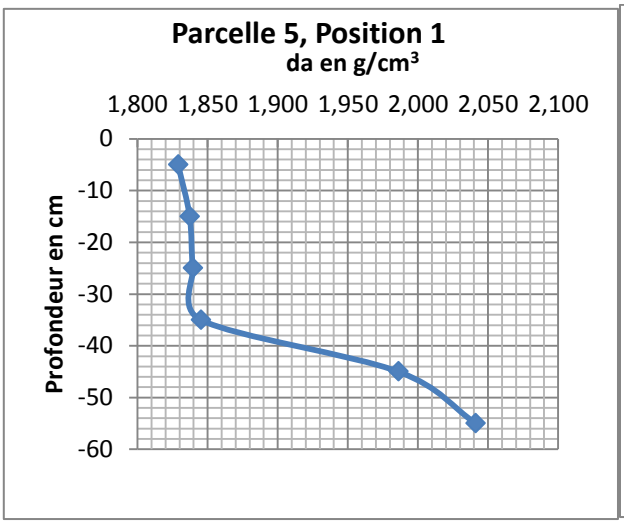


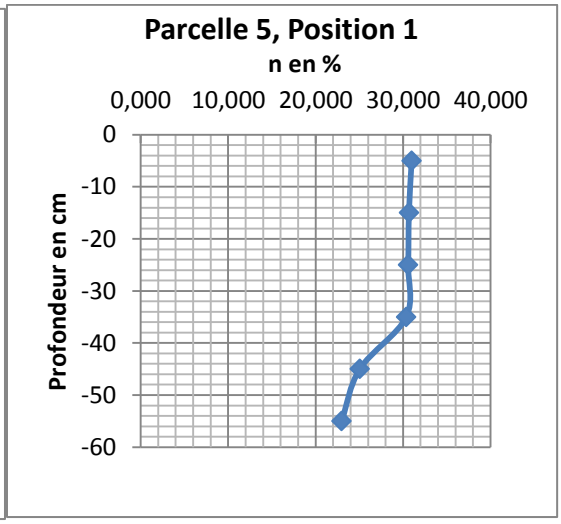


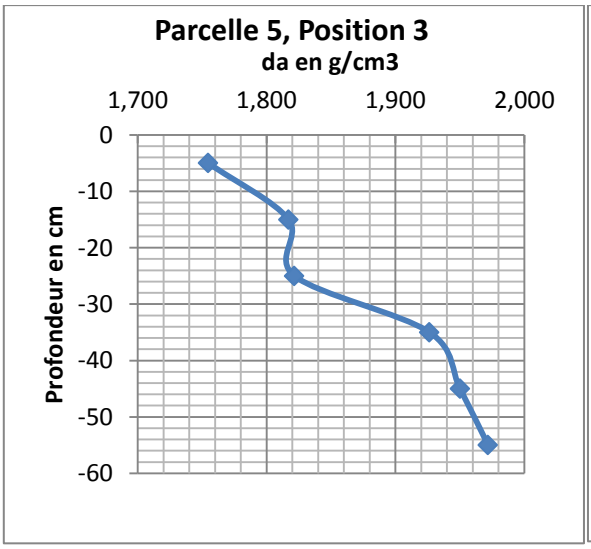


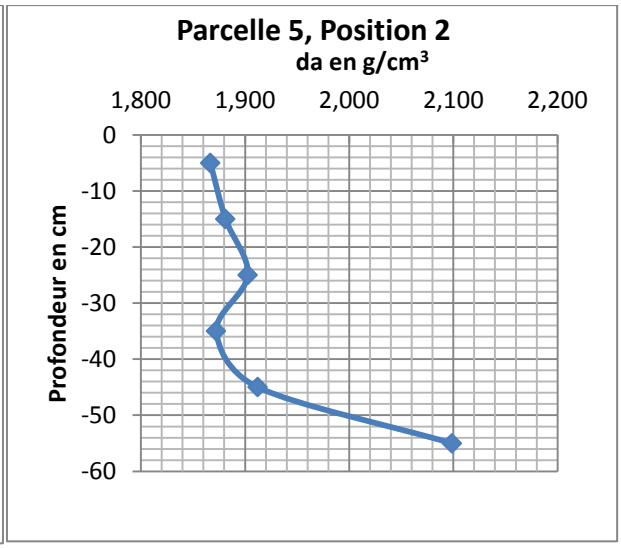


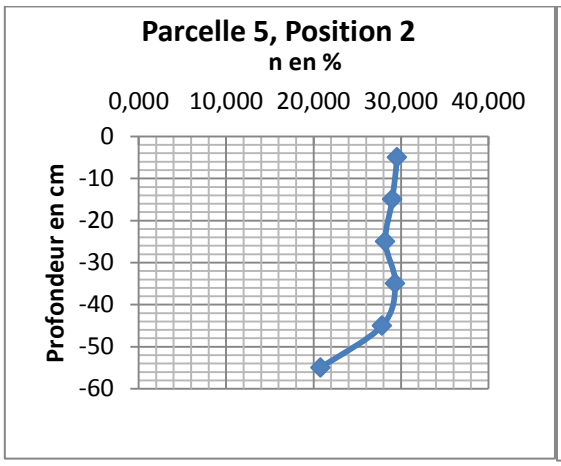
Annexe 3: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (c)

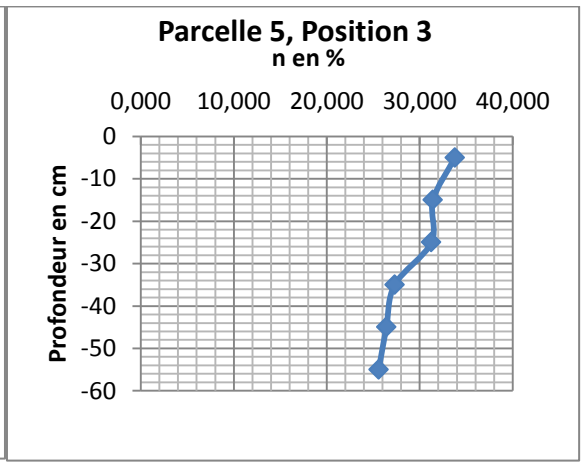




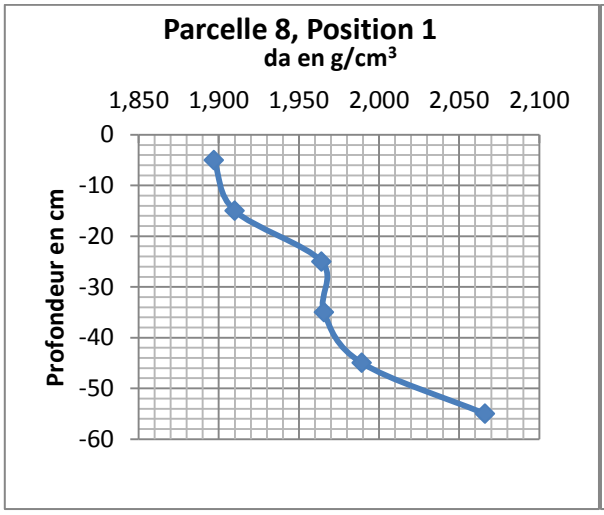


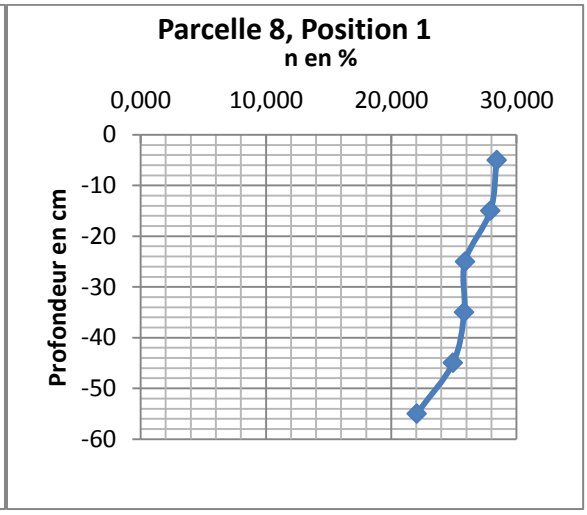


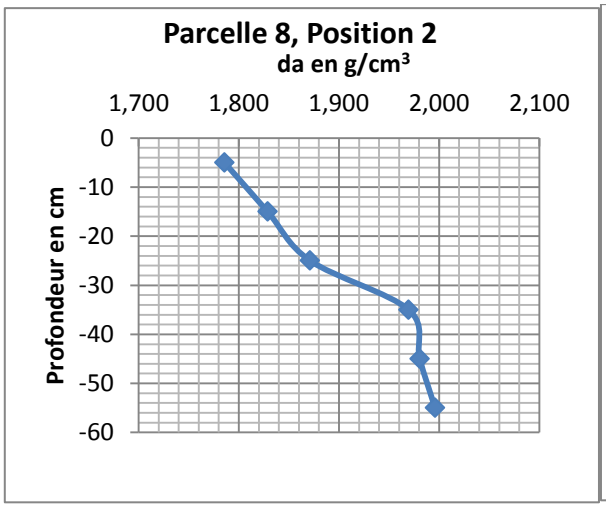


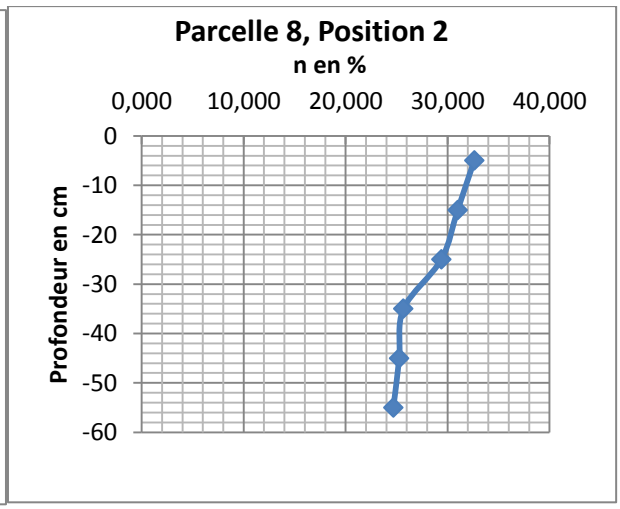


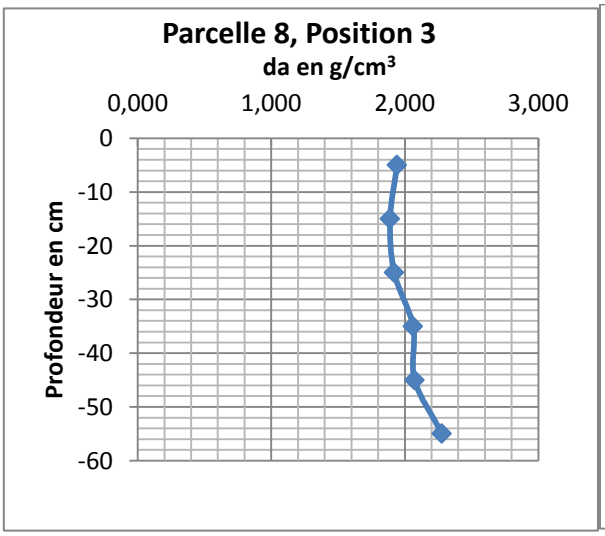
Annexe 4: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (d)

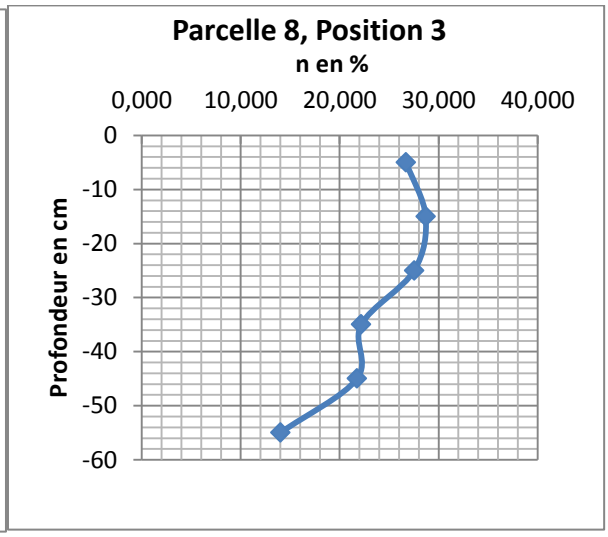




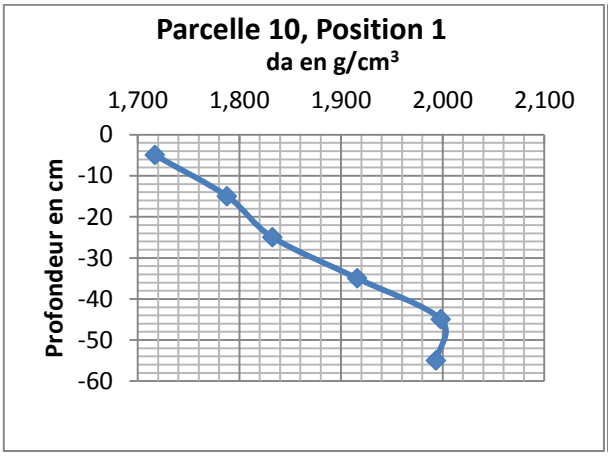


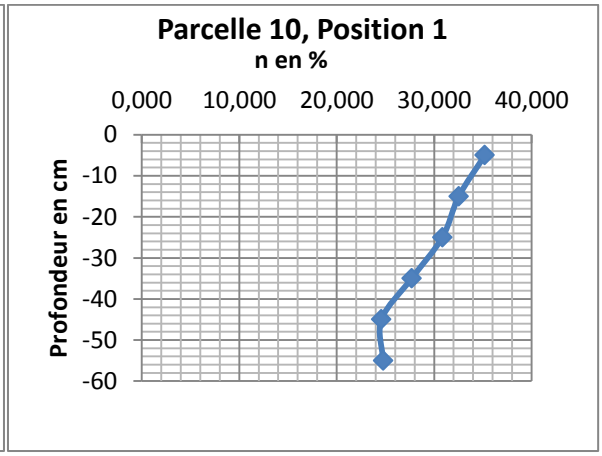


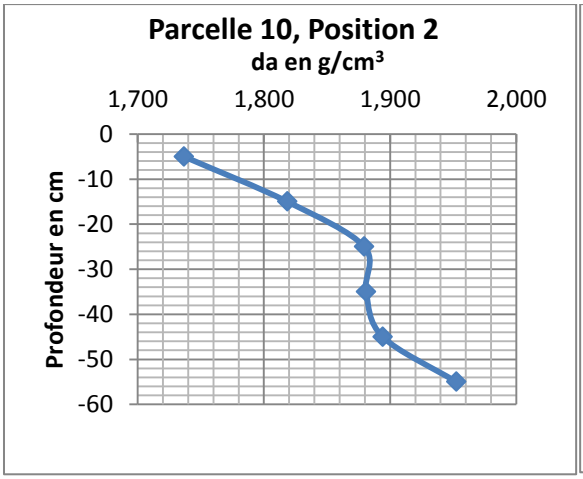


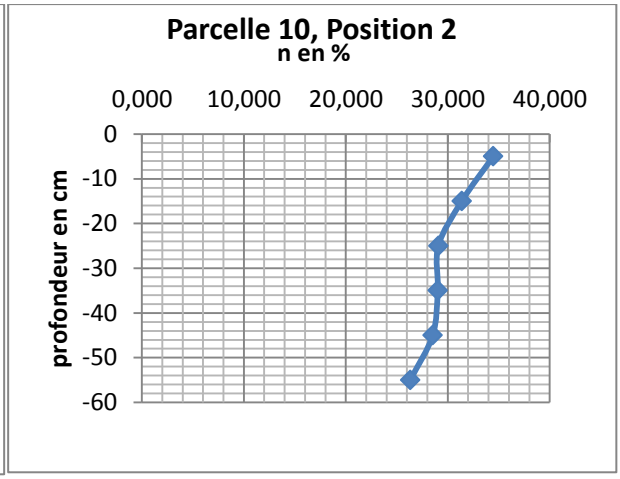


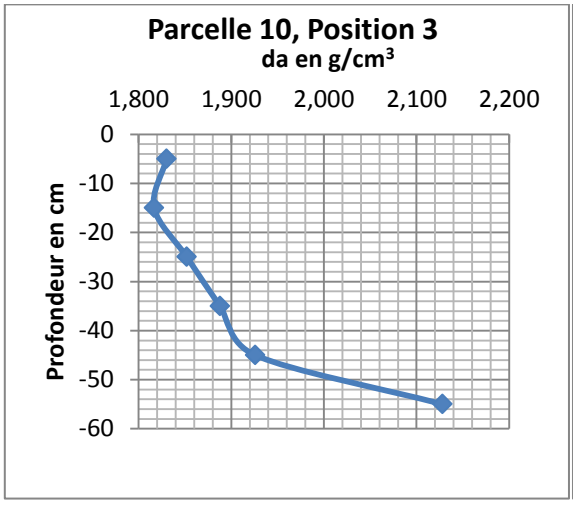
Annexe 5: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (e)

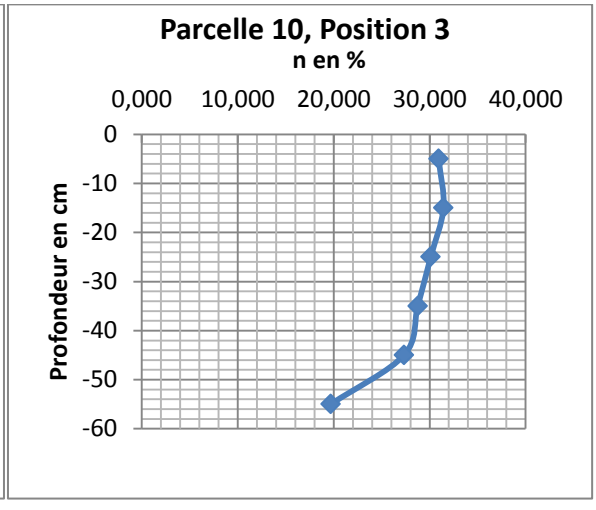




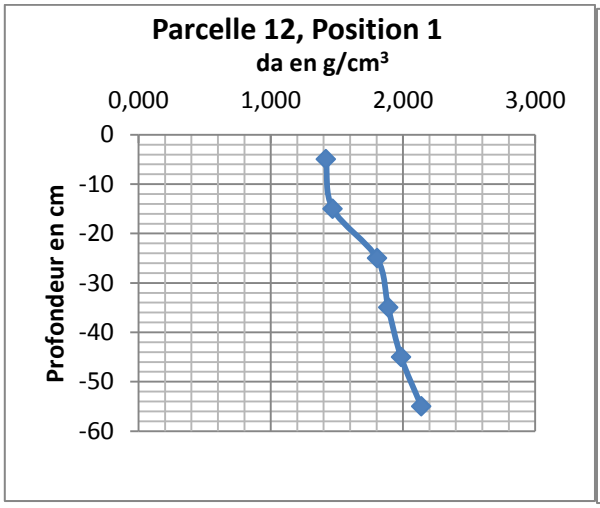


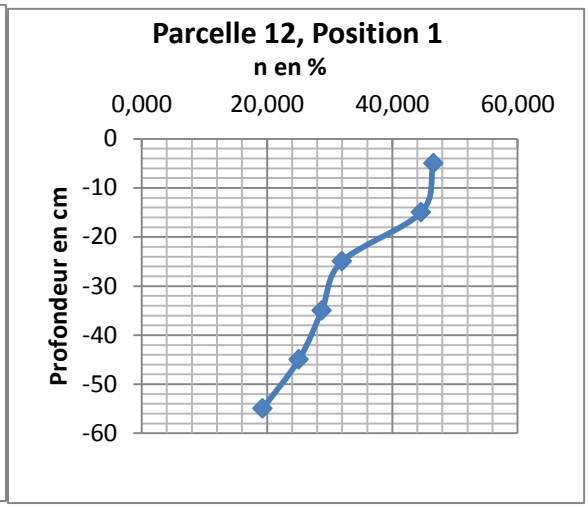


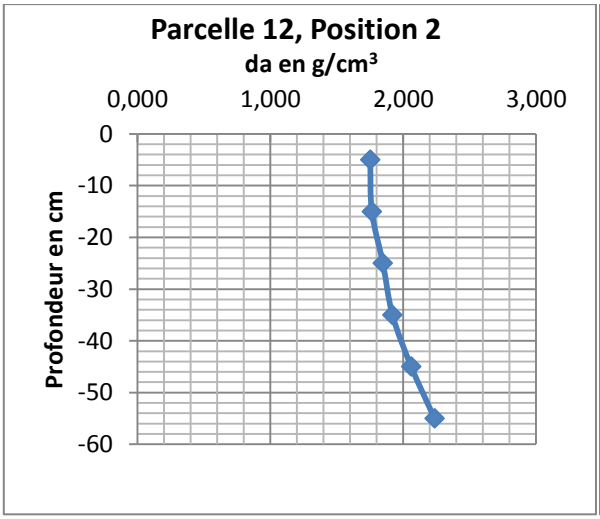


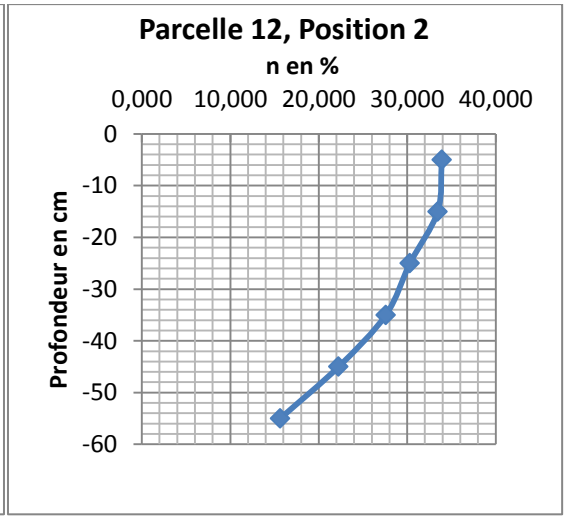


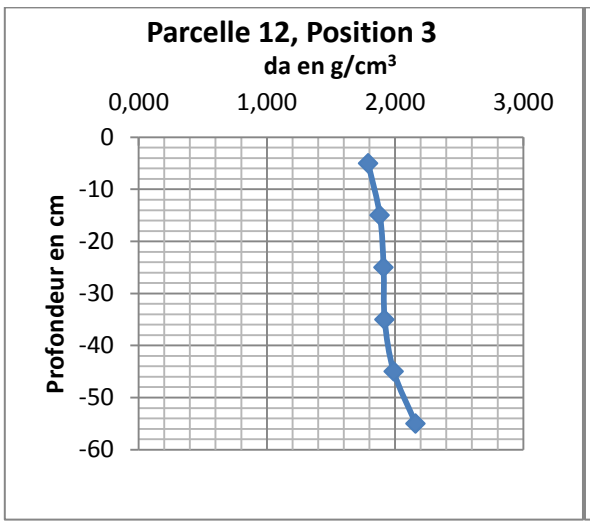
Annexe 6: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (f)

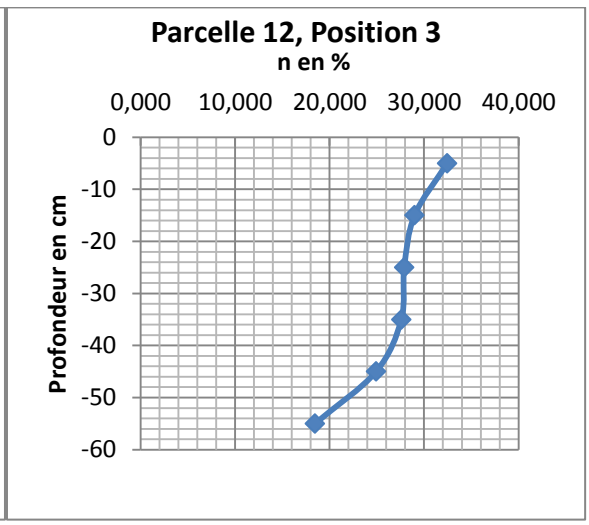




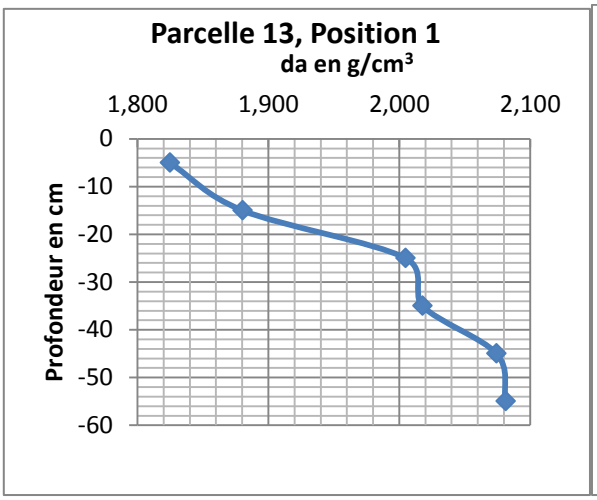


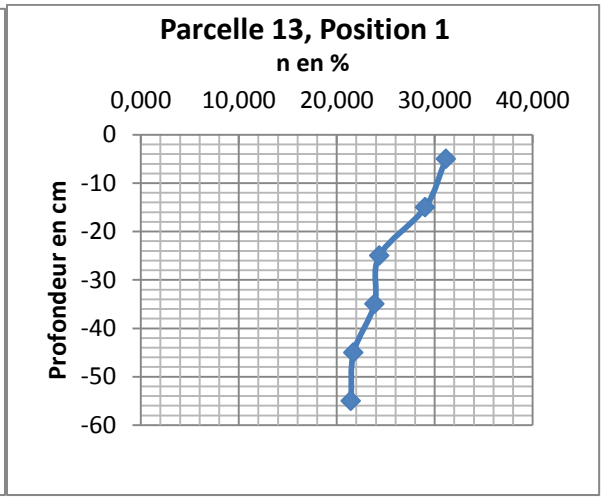


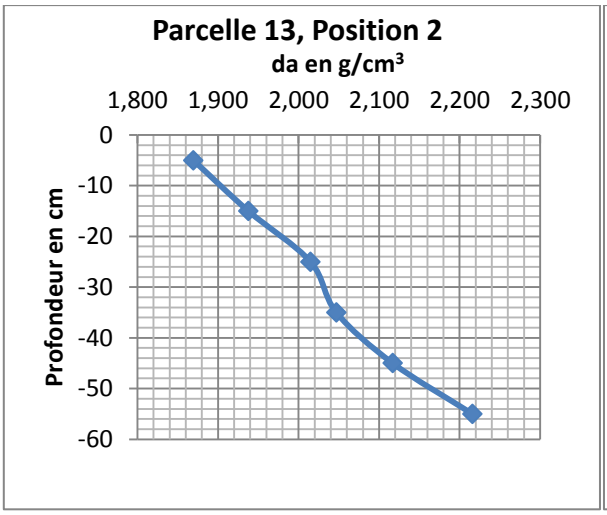


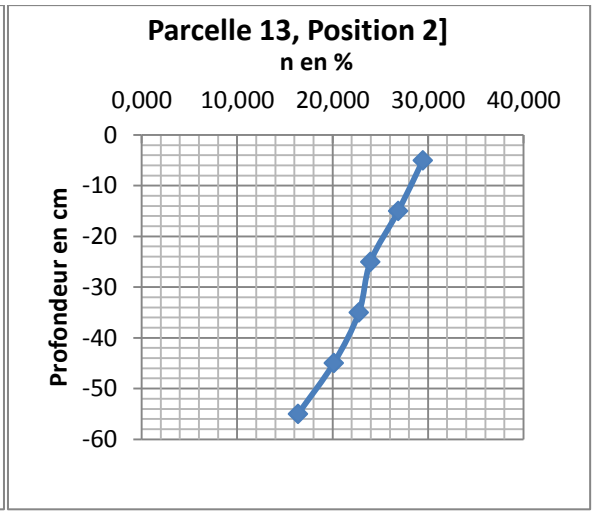


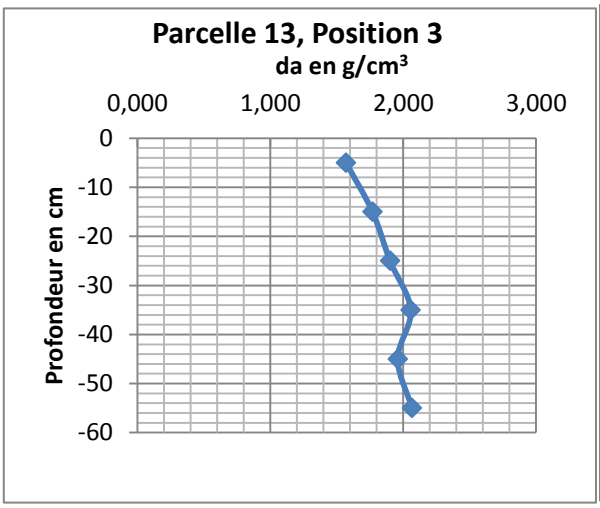
Annexe 7: courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (g)

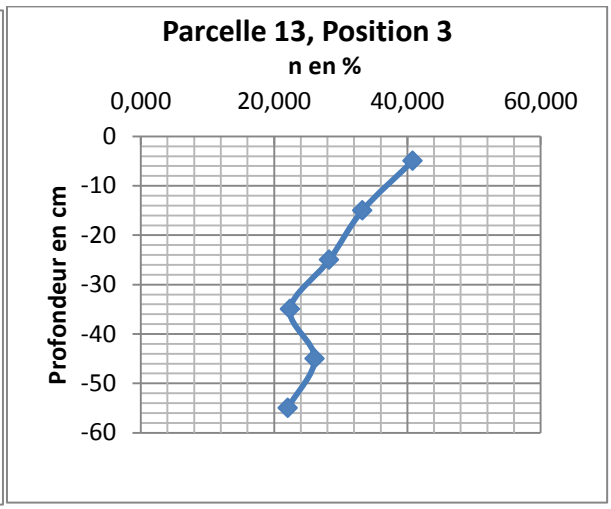




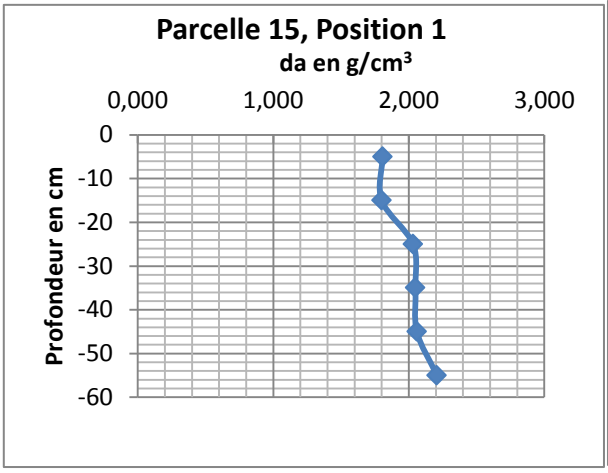


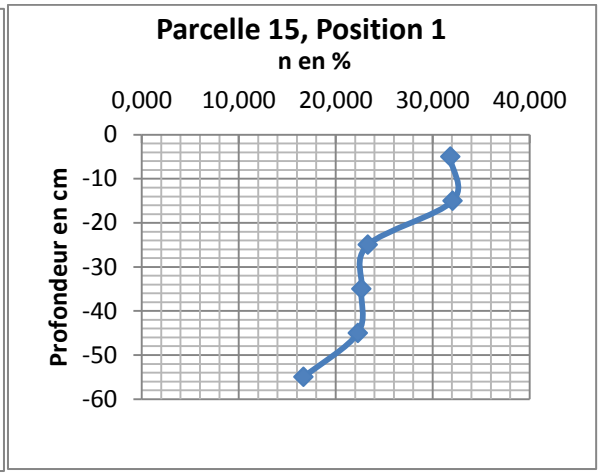


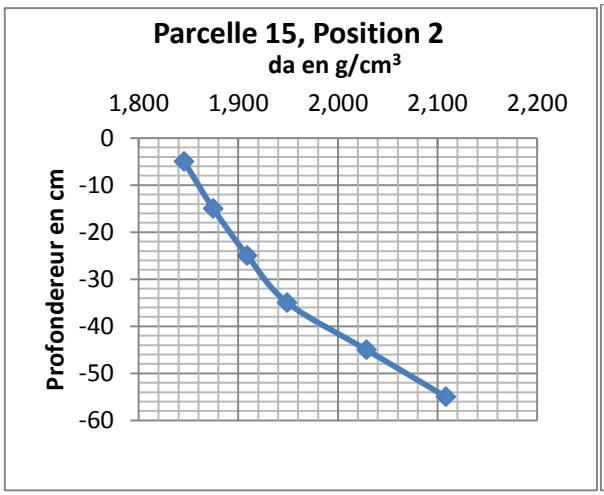


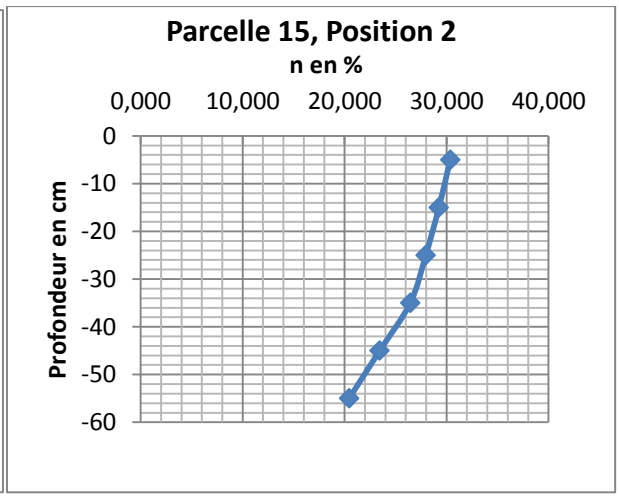


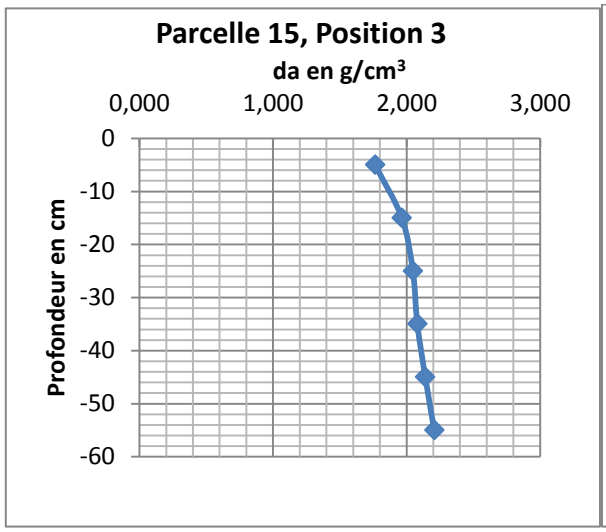
Annexe 8: Courbes de variation de la densité et de la porosité en fonction de profondeur (h)

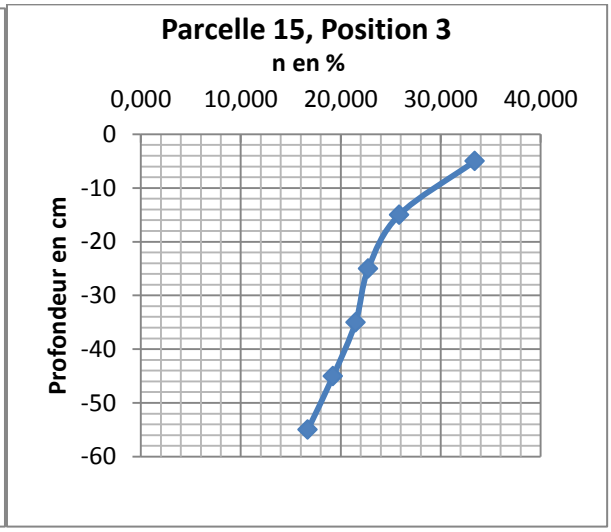




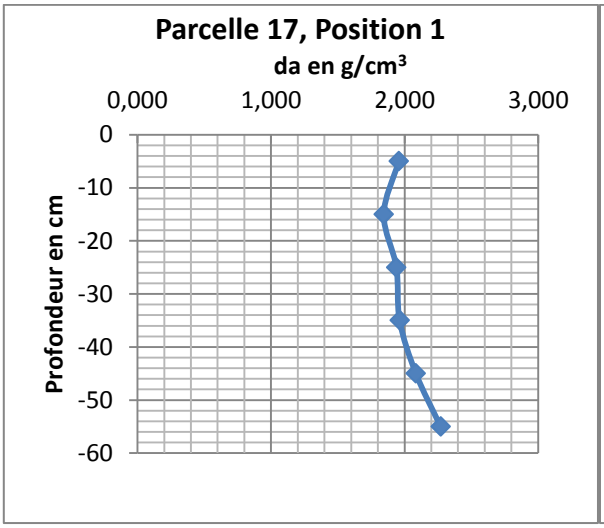


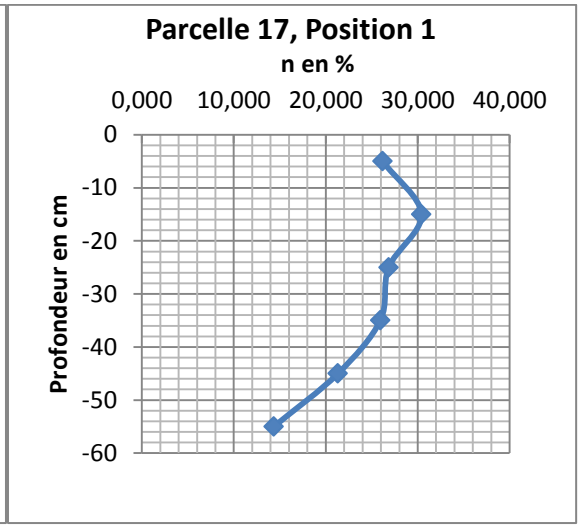


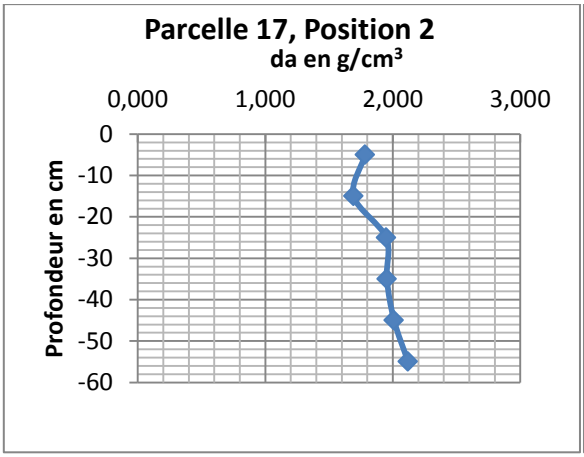


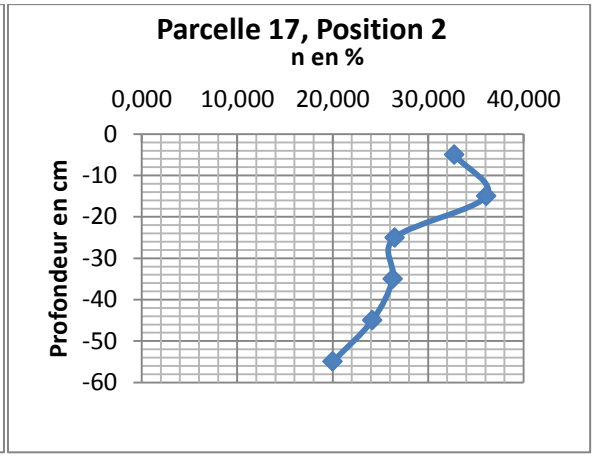


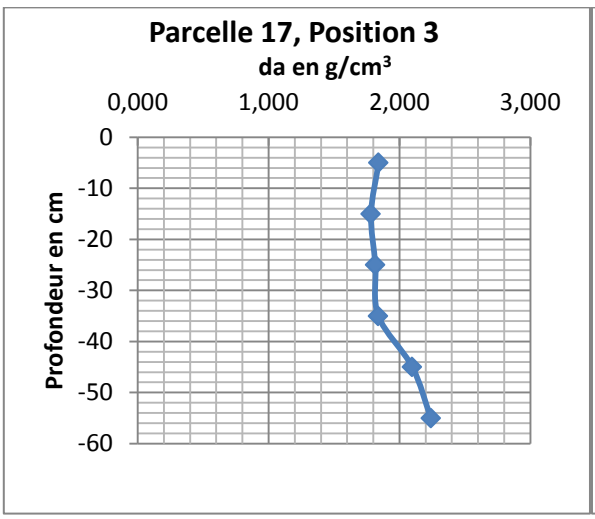
Annexe 9: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (i)

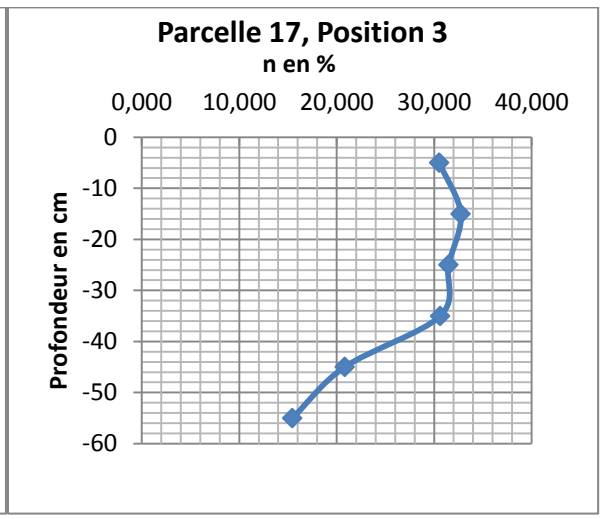




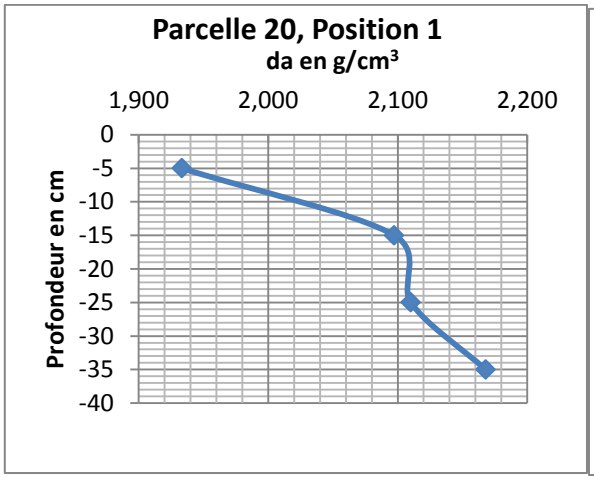


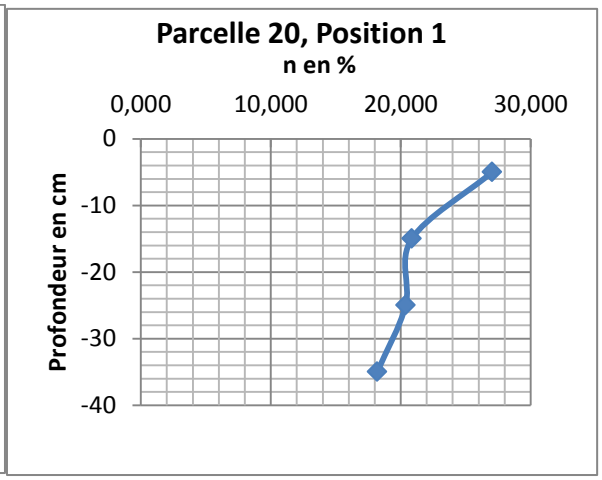


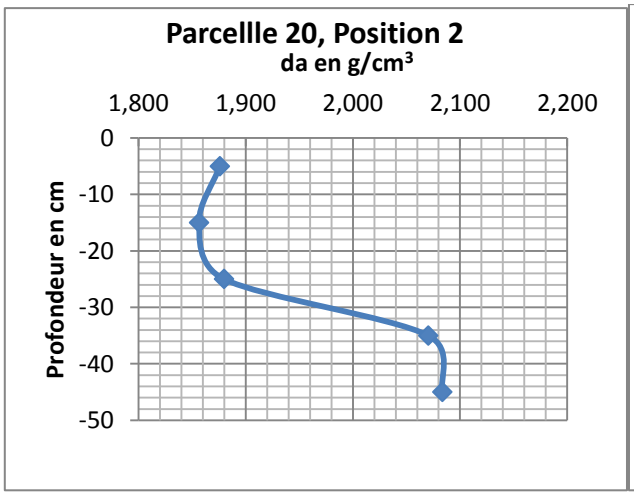


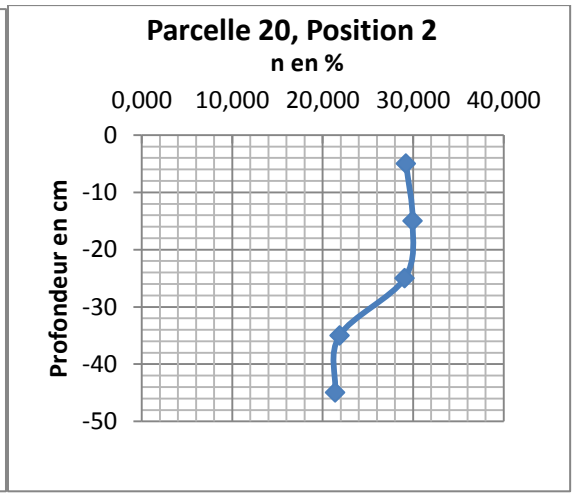


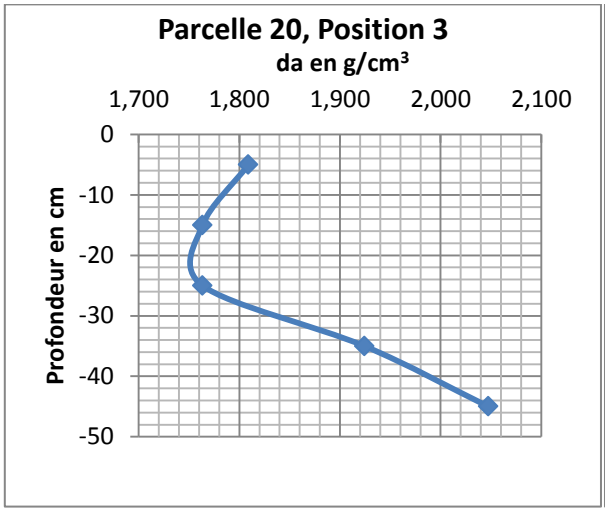
Annexe 10: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (j)

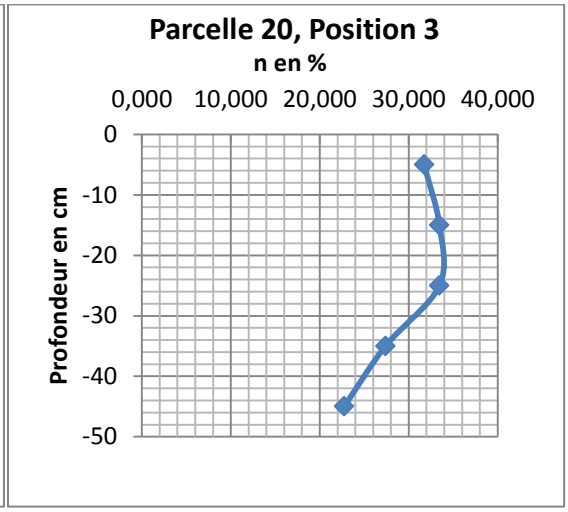




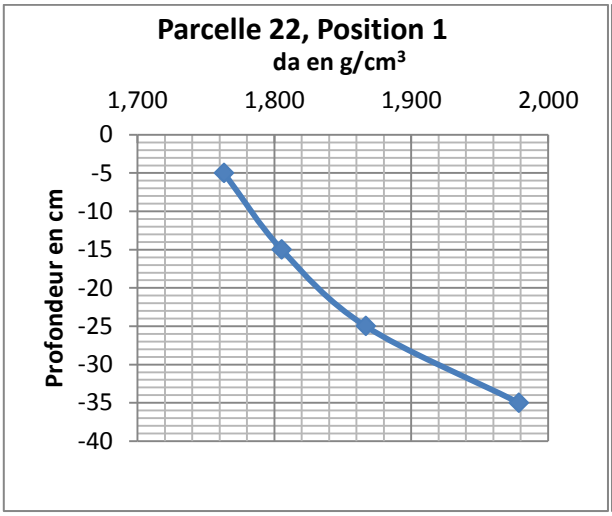


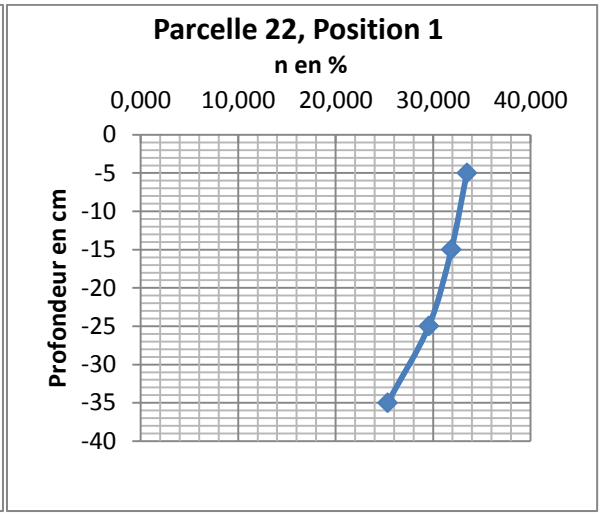


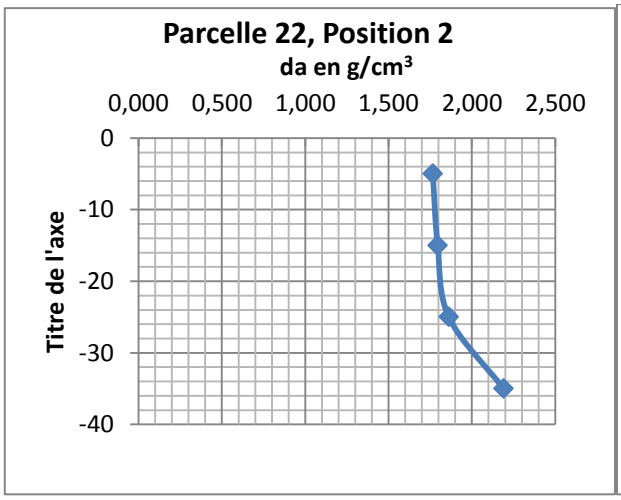


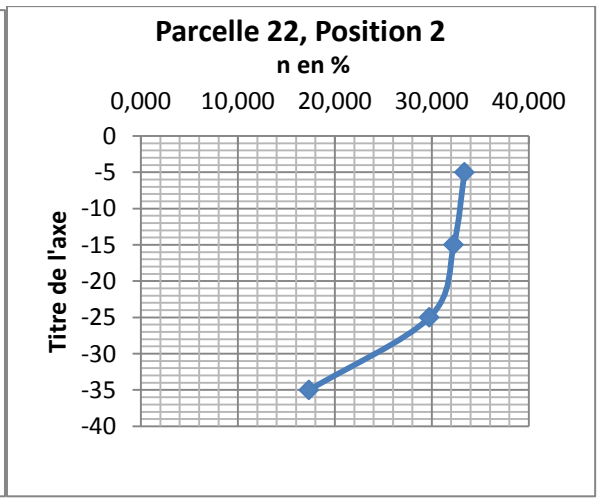


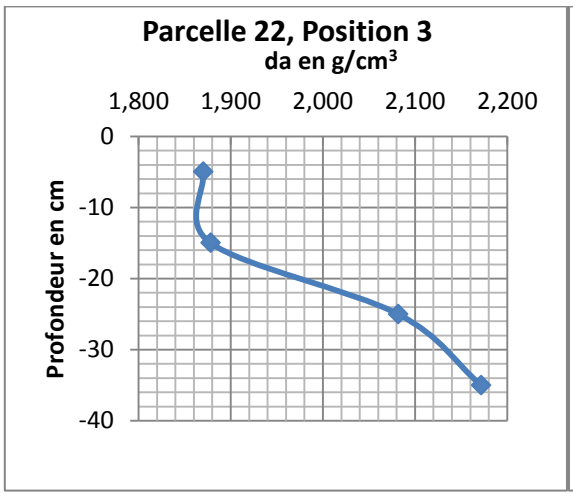
Annexe 11: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (k)

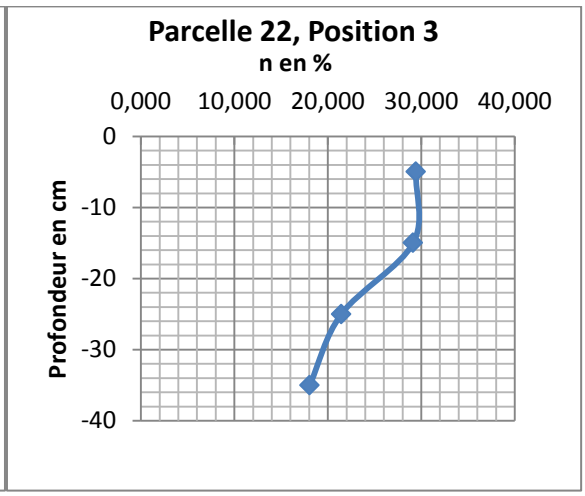




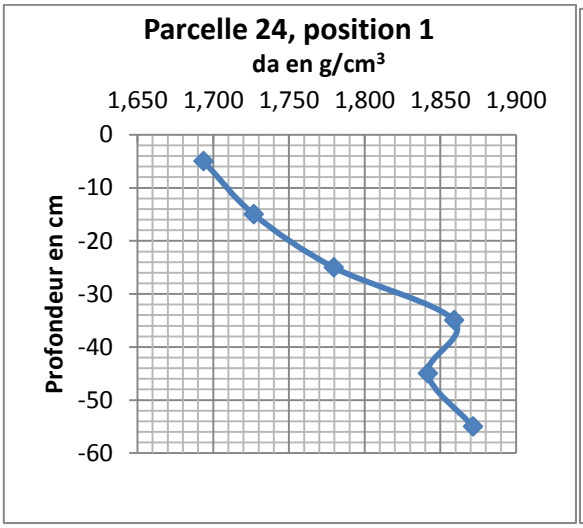


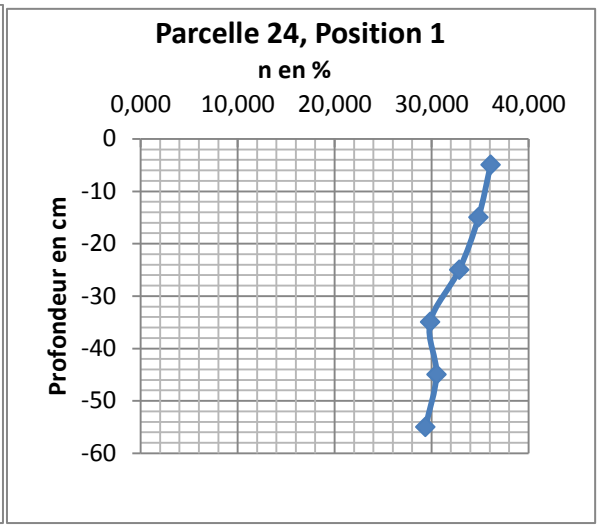


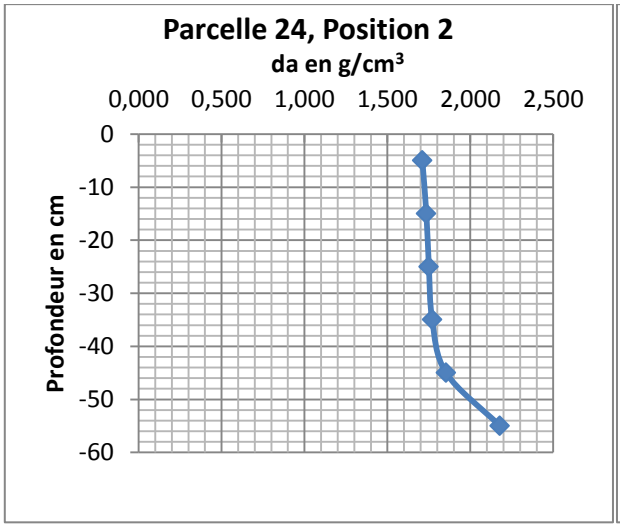


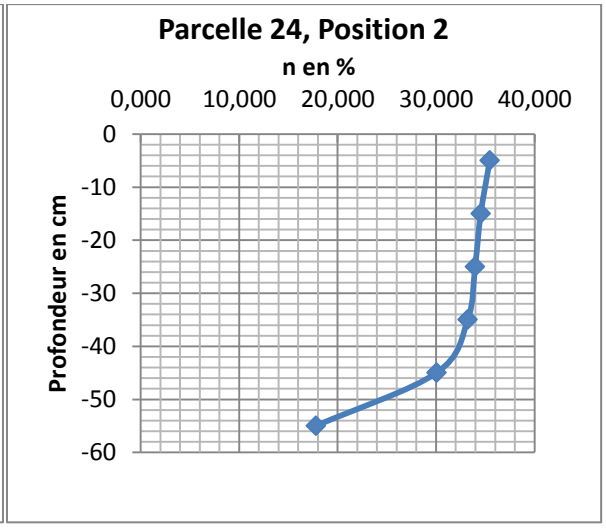


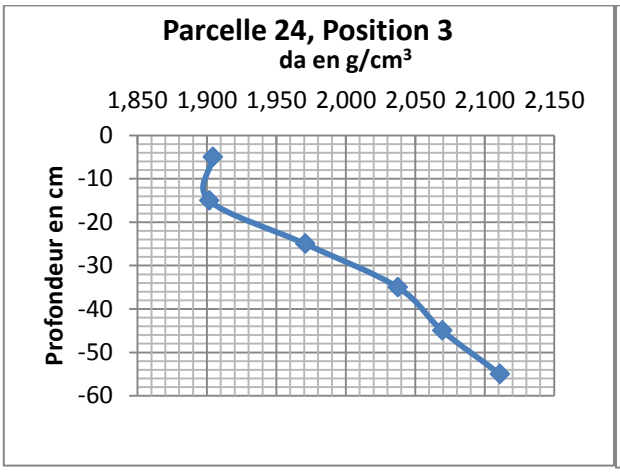
Annexe 12: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (l)

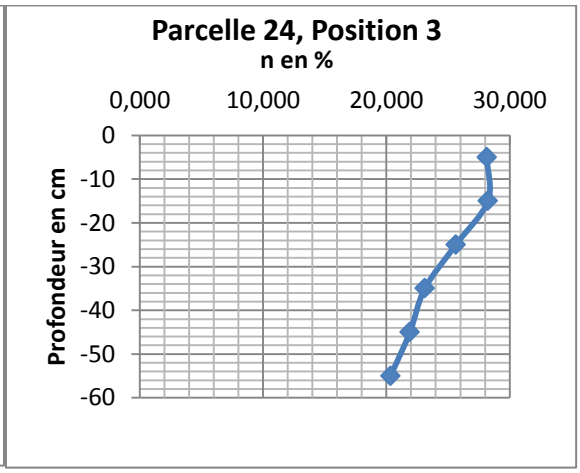




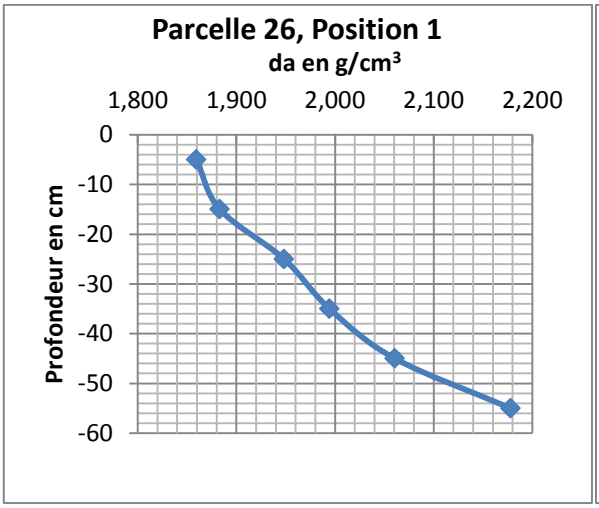


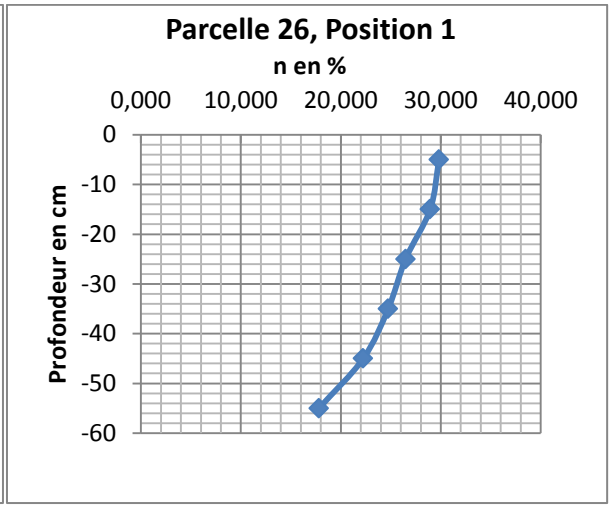


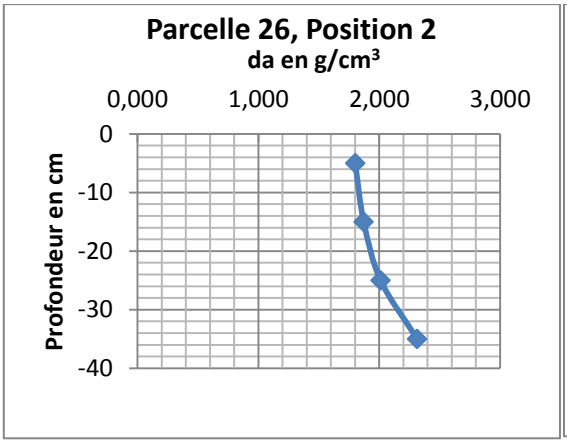


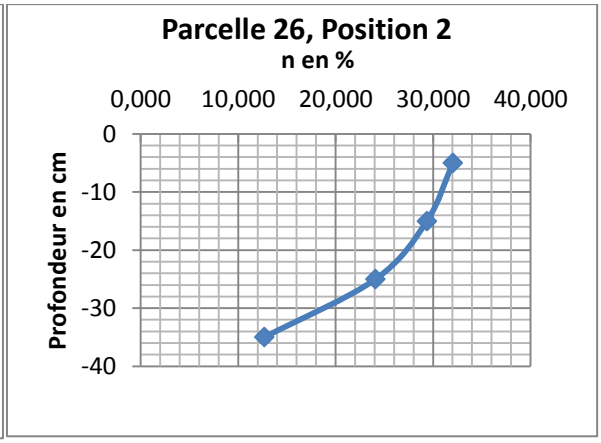


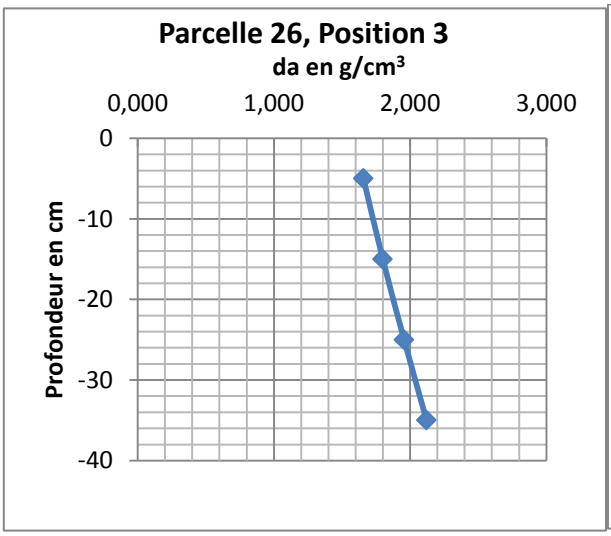
Annexe 13: Courbes de variation de la densité apparente et de la porosité en fonction de profondeur (m)

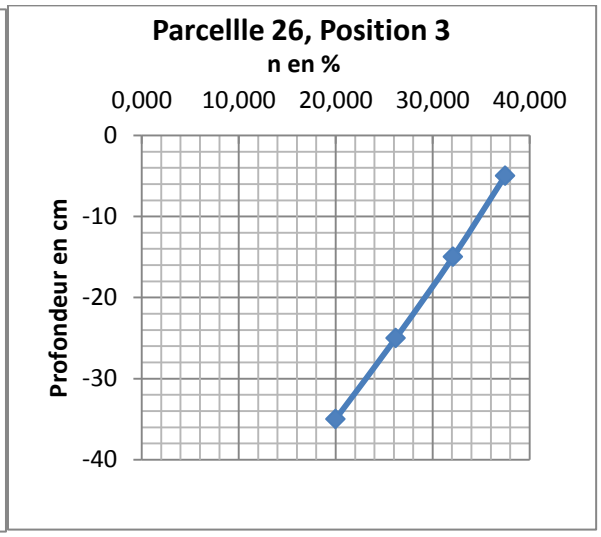




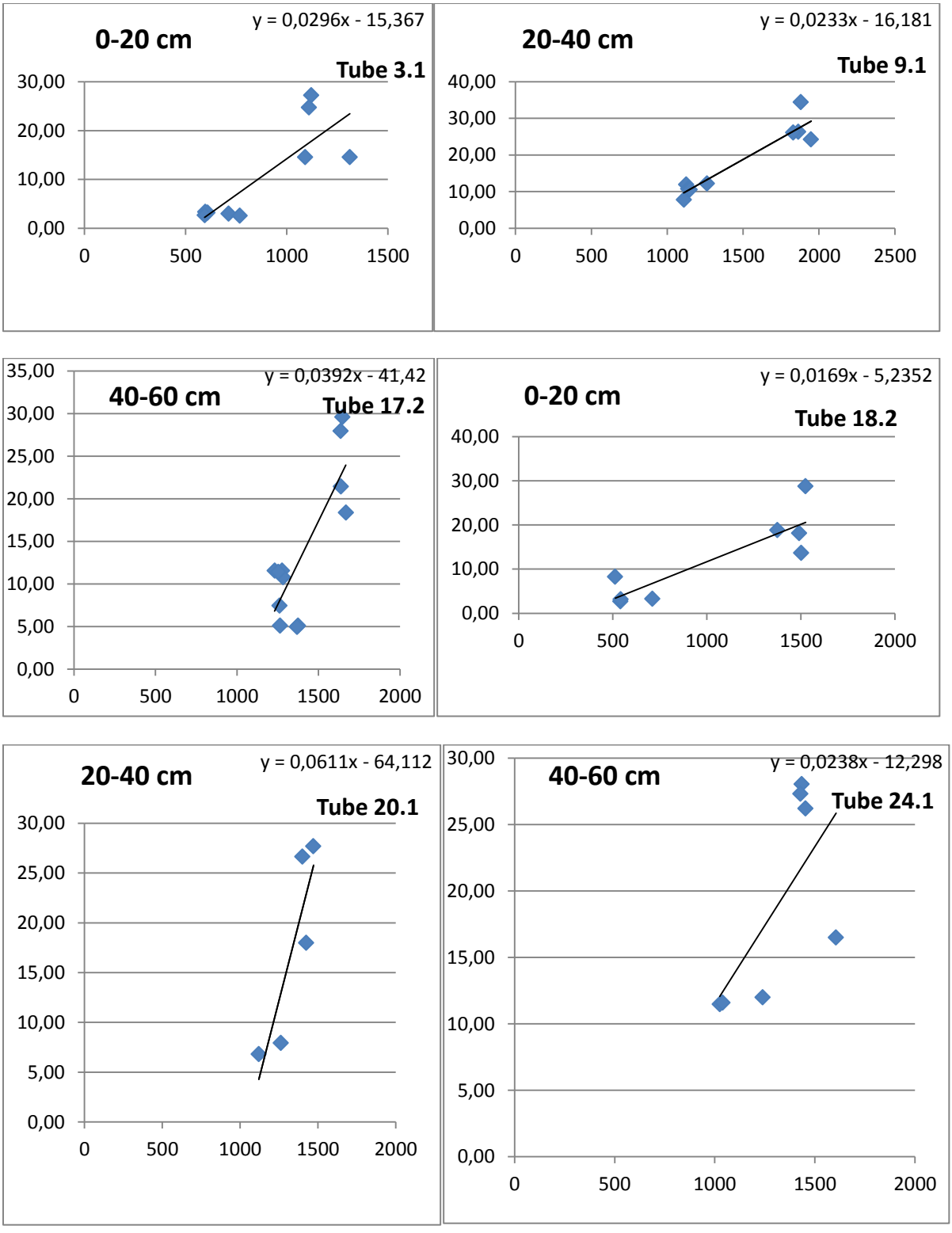




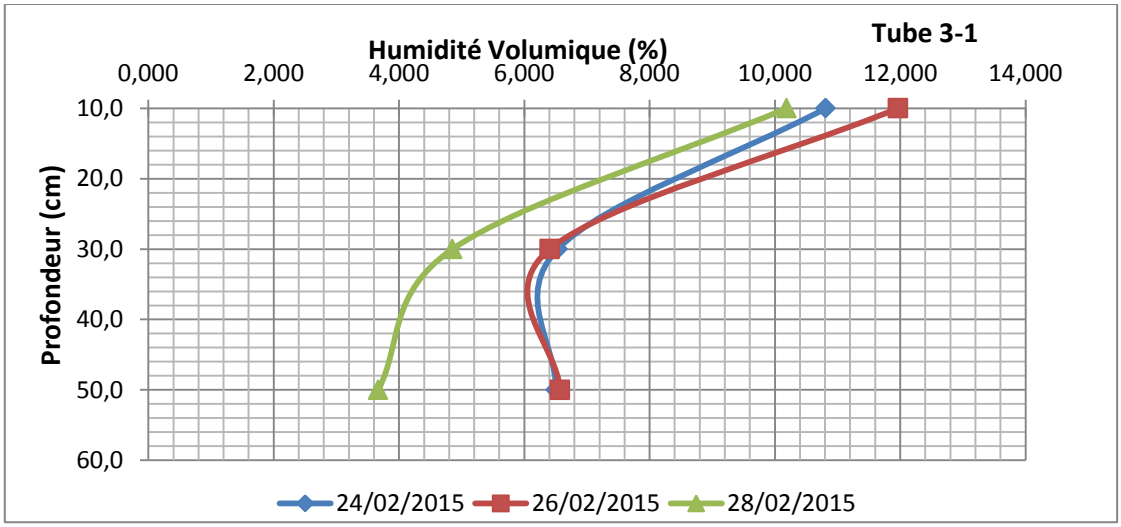


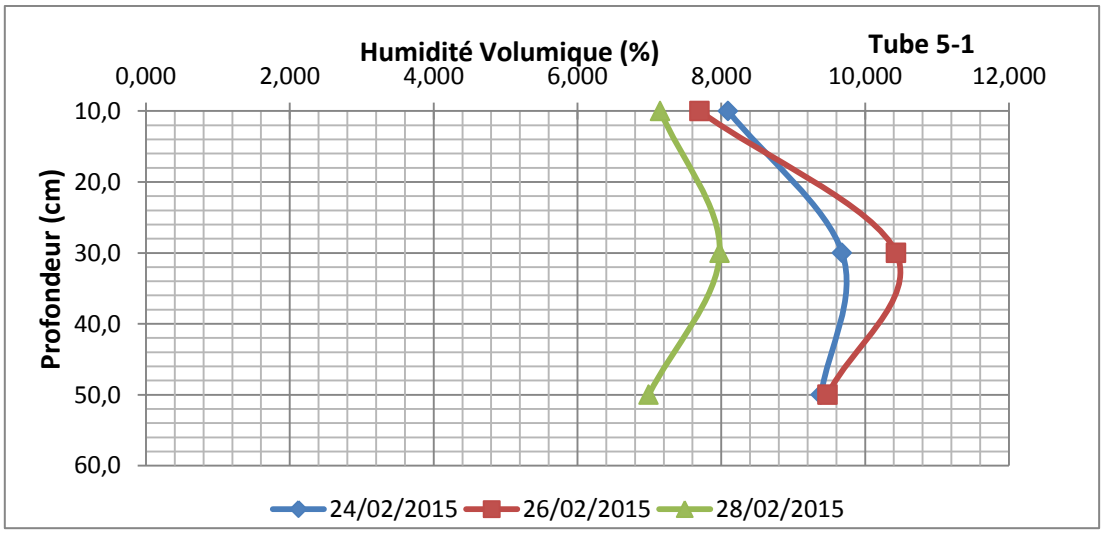


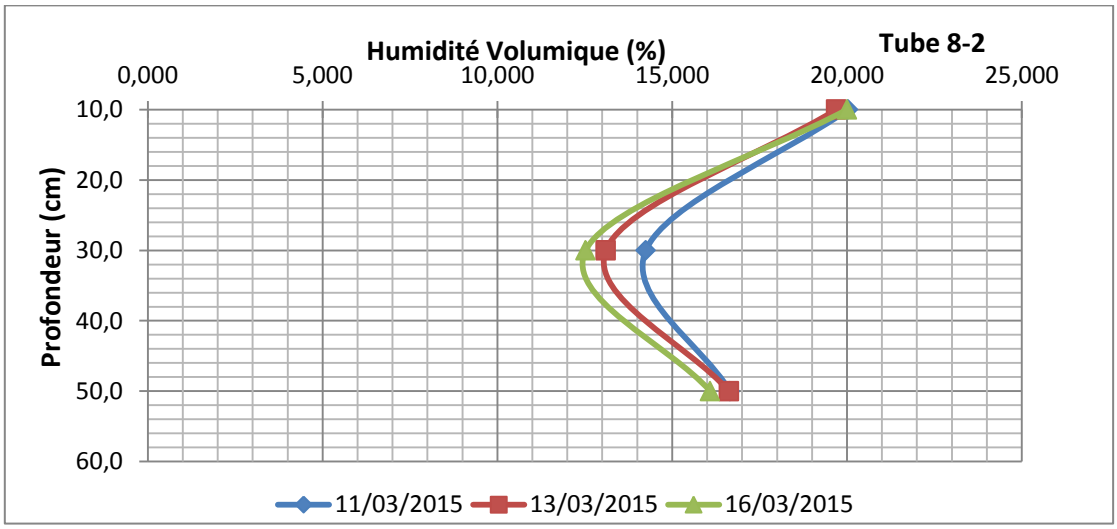
Annexe 14: Courbes d'étalonnage de la sonde à neutron



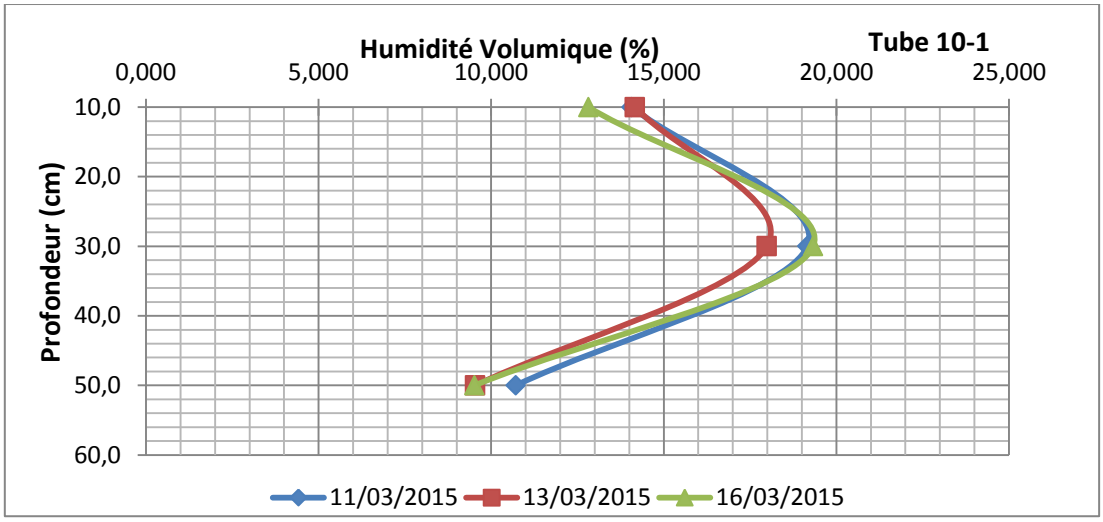
Annexe 15: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (a)

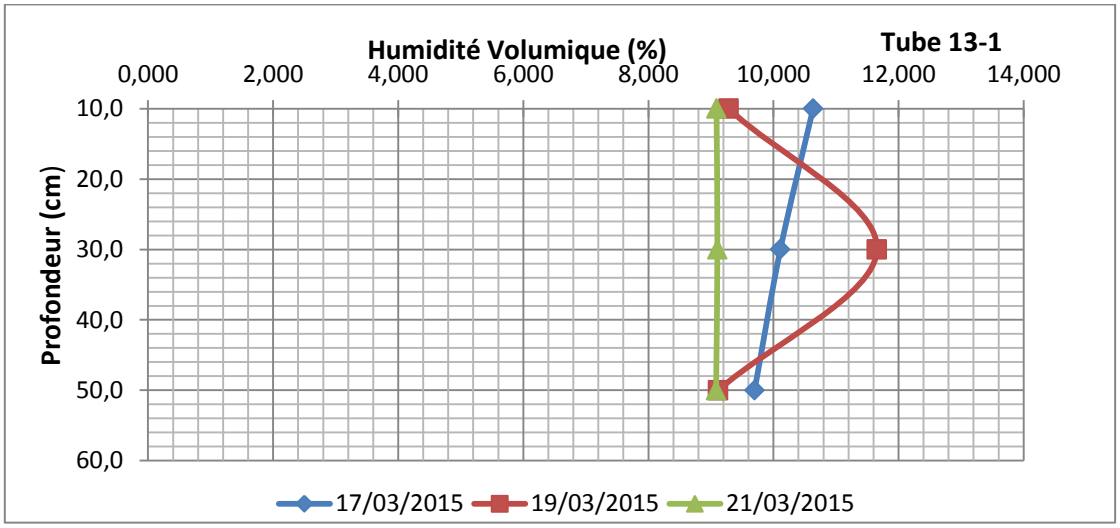


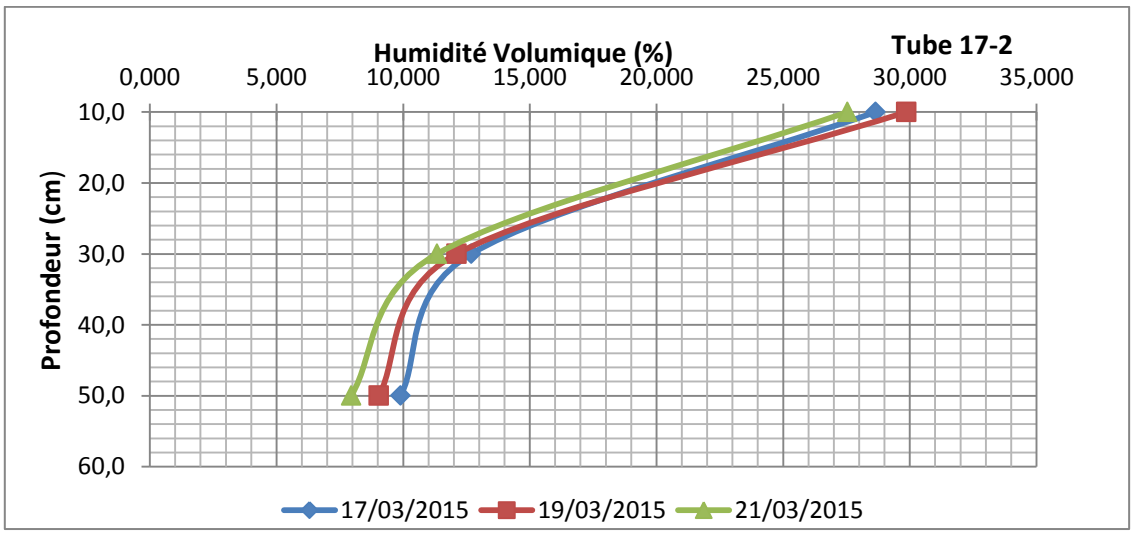




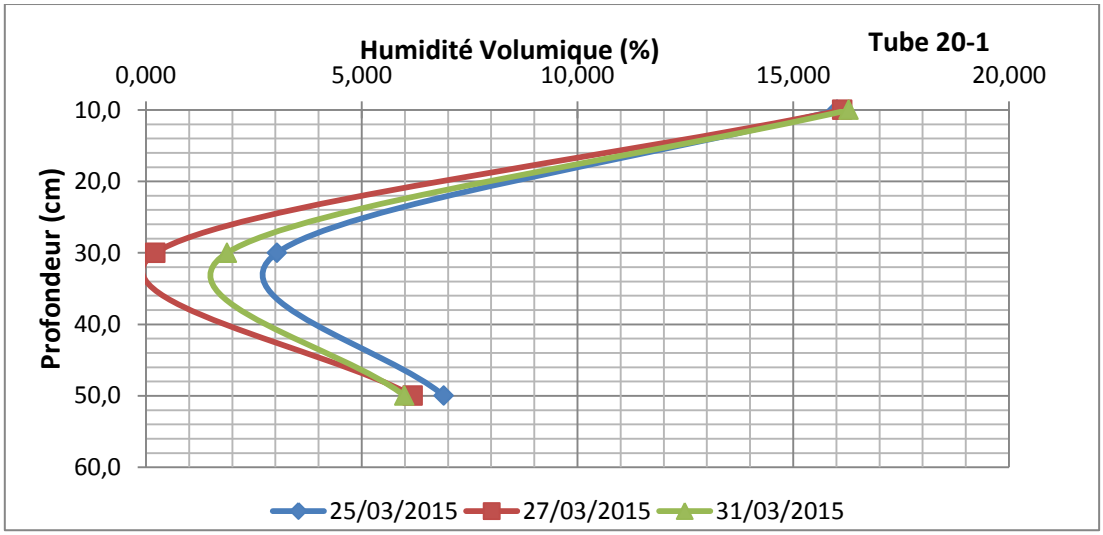
Annexe 16: Courbes de variation du profil hydrique en fonction profondeur (b)

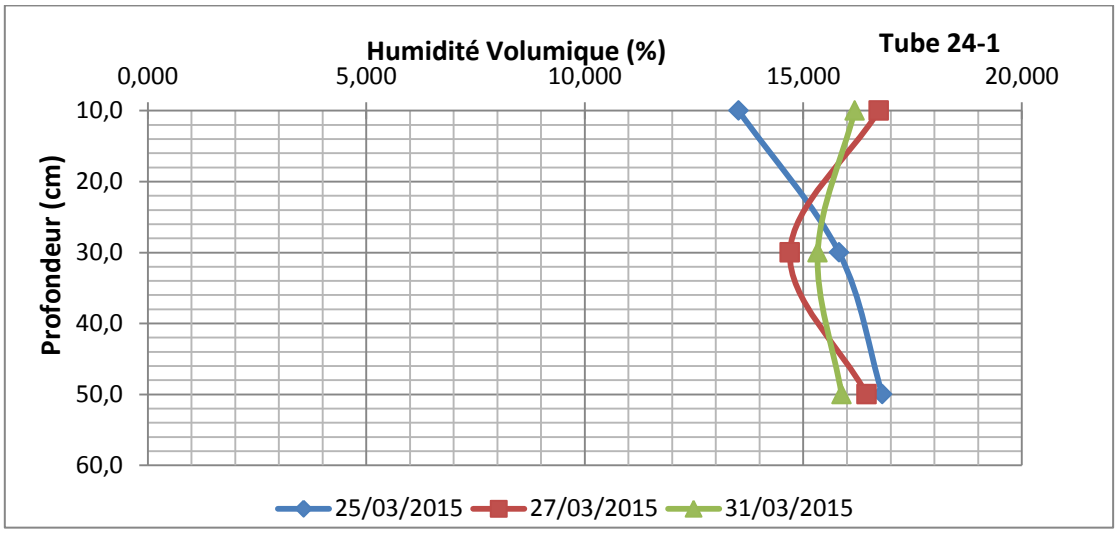






Annexe 17: Courbes de variation du profil hydrique en fonction de profondeur (c)





Annexe 18 : Parcelles dont l'écart-type est supérieur à 5,0 % de porosité totale (écartées à la moyenne)

	Parcelle 1		**Parcelle 7**		**Parcelle 8**		**Parcelle 12**	
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
0-10	0,073	2,752	0,027	1,016	0,081	3,038	0,206	7,755
10-20	0,062	2,355	0,026	0,98	0,042	1,597	0,213	8,022
20-30	0,017	0,659	0,055	2,073	0,046	1,754	0,054	2,029
30-40	0,128	4,828	0,040	1,505	0,055	2,062	0,018	0,662
40-50	0,093	3,521	0,029	1,087	0,051	1,941	0,042	1,593
50-60	0,172	6,473	0,232	8,755	0,147	5,560	0,050	1,905
	Parcelle 13		**Parcelle 16**		**Parcelle 19**		**Parcelle 20**	
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
0-10	0,162	6,107	0,142	5,364	0,064	2,411	0,062	2,351
10-20	0,086	3,237	0,143	5,403	0,006	0,224	0,172	6,503
20-30	0,063	2,389	0,092	3,483	0,122	4,620	0,176	6,659
30-40	0,020	0,766	0,074	2,775	0,169	6,363	0,123	4,626
40-50	0,082	3,097	0,121	4,58	0,044	1,674	0,026	0,965
50-60	0,083	3,115	0,189	7,149	0,063	2,395	roche	
	Parcelle 21		**Parcelle 24**		**Parcelle 26**		**Parcelle 23**	
Profondeur [cm]	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**	**da [g/cm3]**	**n [%]**
0-10	0,122	4,607	0,117	4,413	0,104	3,934	0,029	1,081
10-20	0,086	3,244	0,099	3,727	0,045	1,716	0,117	4,414
20-30	0,192	7,264	0,120	4,523	0,034	1,300	0,101	3,828
30-40	0,233	8,803	0,136	5,141	0,161	6,069	0,182	6,869
40-50	0,029	1,087	0,128	4,834	roche		0,096	3,629
50-60	0,047	1,791	0,161	6,089			roche	