



**HUMIDITES CARACTERISTIQUES ET RESERVE UTILE DES
SOLS DU 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 15 juillet 2015 par :

Gmakagni TABIOU,
Ingénieur Agronome, Option Production Végétale

Travaux dirigés par : Dr. Dial NIANG
Enseignant-Chercheur LEAH-2iE

Dr. Rabah LAHMAR
Enseignant-Chercheur 2iE – CIRAD

Mr Jean-Marie DOUZET
Chercheur au CIRAD-Ouagadougou

Mr Vivien Chaim DOTO
Doctorant LEAH-2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Angelbert BIAOU**

Membres et correcteurs : **Dr. Adjadi MOUNIROU**

Dr. Amadou KEITA

Mr Vivien Chaim DOTO

Promotion [2014/2015]

AVANT-PROPOS

Ce travail a été l'œuvre de cinq mois de recherche sur le site expérimental dénommé Crop-News de Kamboinsé dont le dispositif expérimental fut installé bien avant cette présente étude (en 2012). Le schéma du dispositif a été rigoureusement respecté ainsi que le nombre de répétition et d'unités expérimentales en vue de l'obtention des résultats contenus dans ce rapport.

Aussi, les protocoles expérimentaux et les termes de références que nous avons suivis pour effectuer la présente recherche ont été rédigés par les Commanditaires de ce travail (Chercheurs du CIRAD et du 2iE affectés sur le projet ABACO). Notre charge de travail a été de suivre ces deux documents en vue de leur mise en œuvre.

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Ma mère et mon père qui ont conduit mes premiers pas sur le chemin de l'école ;

Mon épouse Alimatou Sadia ELIASSOU pour ton courage et ta persévérance ;

Ma chère fille Faouzia qui n'a pas toujours bénéficié de la présence de son père lors de ses premiers pas.

Sachez tous que c'est pour une lutte noble car seul le travail libère.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous voudrions dire quelques mots à l'égard de certaines personnes qui sont les Responsables de notre formation à 2iE, à celles qui ont véritablement contribué à la réussite de ce travail/formation et à celles qui ont participé à l'amélioration de la qualité de ce document. Il s'agit de :

Prof. Amadou Hama MAIGA, Directeur Général, Mr Kouassi KOUAME, Secrétaire Général, Dr. Angelbert Chabi BIAOU, Chef de département Hydraulique, notre département hôte, tous à 2iE qui ne ménagent aucun effort pour que notre formation soit de qualité ;

Prof. Hamma YACOUBA, Directeur de la Recherche et son équipe d'avoir accepté de nous accueillir dans le Laboratoire d'Hydrologie et des Ressources en Eau (LEAH 2iE) ;

Dr. Mahamadou KOÏTA, Dr. Ahmed Ousmane BAGRE, notre tuteur à 2iE, pour leur soutien à notre égard ; tous les Enseignants Chercheurs à 2iE pour la qualité de l'enseignement offert ;

Dr. Rabah LAHMAR, Dr. Dial NIANG, tous Enseignants Chercheurs au département Hydraulique à 2iE, Mr Jean-Marie DOUZET Chercheur au CIRAD, Mr Vivien Chaim DOTO, Doctorant au LEAH, qui sont nos Encadreurs de Mémoire. Merci pour leur encadrement, disponibilité, conseil et soutien de toute nature à notre égard et pour le fait qu'ils n'ont jamais cessé de nous prendre comme leur fils et/ou petit frère ;

Toute l'équipe du projet ABACO et WASSA du CIRAD/2iE pour les initiatives qu'elle émet en vue de permettre aux Stagiaires de s'initier dans le monde de la recherche et pour leur appui – accompagnement facilitant la réussite de notre mission ;

Nos Collègues Stagiaires sur l'expérience Crop-News de Kamboinsé, au personnel d'appui sur le terrain à savoir Mr Emmanuel ZONGO, Mr Alexandre OUEDRAOGO pour leur appui et soutien lors de la phase de collecte et analyse des données sur le terrain comme au laboratoire.

Nous ne pourrions finir sans remercier la Présidence de l'Université de Lomé, le Prof. Jean Mianikpo SOGBEDJI, Directeur de l'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA), Prof. Ouézou Yaovi AZOUMA, Chef du département Génie Rural et Machinisme Agricole à l'ESA, notre Directeur Technique et à toute l'équipe du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest-Projet Togo, qui finance notre formation, en l'occurrence Dr. Assimiou ADOU RAHIM ALIMI, Coordonnateur Opérationnel Délégué dudit projet pour leur écoute et soutien.

Toute la famille TABIOU, veuillez trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

Cette recherche a été menée sur le dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé installé en 2012. Cette expérience vise une meilleure compréhension des transferts hydriques du sol avec une bonne maîtrise des différents processus. C'est dans ce contexte que notre étude dont le thème est «humidités caractéristiques et réserve utile des sols» dudit dispositif a été proposée. Ainsi, nous cherchons à suivre l'évolution du stock d'eau des sols selon certaines pratiques culturales associées à des densités croissantes d'arbustes natifs de *Piliostigma reticulatum* (0, 500, 1000 et 2000 arbustes/hectare): non labour-sans arbustes (NT-NS) représentant la situation de référence, non labour avec haute densité des arbustes (NT-HSD), non labour avec faible densité des arbustes (NT-LSD), Zaï sans arbustes (Z-NS), Zaï avec haute densité des arbustes (Z-HSD) et Zaï avec faible densité des arbustes (Z-LSD).

Pour atteindre cet objectif, des échantillons de sols ont été traités au laboratoire au pF3 et au pF4,2 en vue de déterminer les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent constituant les paramètres de base pour la détermination de la réserve utile des sols. A travers le refus de ces sols, nous avons eu une certaine quantité représentant les graviers pour procéder à leur analyse en vue de déterminer leur contribution à la constitution du stock d'eau sur ces sols.

Les résultats révèlent une différence sur les valeurs de la réserve utile selon les pratiques culturales. Les pratiques culturales conduites jusqu'en 2014 ont donné une contribution de 6 à 16 mm/m de sol par rapport au témoin NT-NS de la situation de référence. Ce qui permet d'affirmer que les pratiques culturales ont amélioré la réserve utile sur les sols après deux ans d'expérimentation. Le faible degré d'altération des graviers a entraîné une petite contribution de leur part à la constitution du stock d'eau du sol estimée à environ 9%.

Mots Clés :

-
- 1 – Réserve utile du sol
 - 2 – Presse à membrane de Richards
 - 3 – Humidités caractéristiques
 - 4 - Kamboinsé
 - 5 – Dispositif Crop-News

ABSTRACT

This research has been conducted at Kamboinsé on experimental site Crop-News installed in 2012. This experience leads to better understanding of soil water transfer with high understanding of different processes. It is in that case that our topic entitled «Moisture characteristics and soil available water» has been proposed. Then, we want to follow the evolution of soil available water according to some cultural practices: no tillage - no shrub (NT-NS) which represent the reference situation, no tillage-high shrub density (NT-HSD), no tillage-low shrub density (NT-LSD), Zaï –no shrub (Z-NS), Zaï - high shrub density (Z-HSD) and Zaï - low shrub density (Z-LSD).

To achieve this objective, soil samples have been analyzed in laboratory at pF3 and at pF4.2 in order to determine field water content at the field capacity and at the permanent wilting point which constitute the basic parameters for determination of soil available water. Due to the soil retained during sieve analysis, we have found some representative quantities of gravels in order to proceed on its analysis for determining its own contribution to the soil water storage.

The results give the difference values on the available moisture according to the cultural practices. Referring to the no tillage - no shrub (NT-NS), the cultural practices conducted during 2014 have given the soil contribution of 6 to 16 mm/m.

This is permit to confirm that the cultural practices have improved the soil water holding capacity after two years of the experiment. The low level of gravels alteration has given its own small contribution of soil water storage estimated at about 9%.

Key words:

- 1 – Available water
- 2 – Pressure membrane apparatus
- 3 - Characteristic moistures
- 4 - Kamboinse
- 5 –Crop-News experimental device

LISTE DES ABREVIATIONS

ABACO : Agroecology Based Aggradation Conservation Agriculture

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

ESA : Ecole Supérieure d'Agronomie

INERA : Institut d'Etudes et de Recherches Agricoles

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IRH : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques

LEAH : Laboratoire d'Hydrologie et des Ressources en Eau

NT-HSD: No Tillage – High Shrub Density

NT-LSD: No Tillage – Low Shrub Density

NT-NS: No Tillage – No Shrub

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PMR : Presse à Membrane de Richards

PPAAO-Togo : Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest – Projet Togo

RU: Réserve Utile

WASSA: Woody Amendments for Soudano-Sahelian Agriculture

Z-HSD: *Zai* – High Shrub Density

Z-LSD: *Zai* – Low Shrub Density

Z-MSD: *Zai* - Midium Shrub Density

Z-NS: *Zai* – No Shrub

ZST : Zones Semi-arides Tropicales

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	<i>i</i>
<i>Dédicace</i>	<i>ii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>vi</i>
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES	3
I. INTRODUCTION	4
II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	6
2.1. Bilan hydrique et réserve utile	6
2.2. Constitution du sol et notion d'humidité.....	7
2.3. Méthodes de détermination des humidités caractéristiques du sol	10
2.4. Travail du sol et son influence sur les propriétés hydriques des sols.....	11
III. HYPOTHESES ET OBJECTIFS DU TRAVAIL	13
3.1. Hypothèses de travail et question de recherche	13
3.2. Objectifs de l'étude	13
3.2.1. Objectif général	13
3.2.2. Objectifs spécifiques.....	13
IV. MATERIEL ET METHODES	14
4.1. Présentation du site et dispositif expérimental.....	14
4.1.1. Localisation géographique et caractérisation pédoclimatique du site expérimental	14
4.1.2. Description du dispositif expérimental Crop-News.....	16
4.2. Détermination des humidités caractéristiques et de la réserve utile.....	18
4.2.1. Prélèvement des échantillons de sol et conditionnement.....	18
4.2.2. Protocole de détermination des humidités caractéristiques et de la réserve utile	19
4.3. Détermination des humidités des graviers et méthode d'estimation de leur contribution à la constitution de la réserve en eau du dispositif Crop-News	21
4.3.1. Matériel	22
4.3.2. Description du protocole	23
4.3.3. Méthode de détermination de la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau des sols du dispositif Crop-News.....	23
4.4. Analyse statistique	24

V.	RESULTATS ET DISCUSSION	25
5.1.	Evolution des humidités caractéristiques selon le mode de gestion du sol.....	25
5.1.1.	Humidités caractéristiques sur le témoin NT-NS en 2012.....	25
5.1.2.	Humidités caractéristiques dans les parcelles expérimentales en 2014	26
5.2.	Evolution de la réserve utile des sols	27
5.2.1.	Réserve utile sous le mode de gestion NT-NS	27
5.2.2.	Réserve utile dans les parcelles sous un mode de gestion du sol en 2014	28
5.3.	Contribution des graviers à la constitution de la réserve hydrique du sol.....	29
5.4.	Discussion des résultats	31
VI.	CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	34
VII.	BIBLIOGRAPHIE	35
VIII.	ANNEXES	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Profondeurs échantillonnées par profil en 2012.....	19
Tableau 2 : Humidités caractéristiques (%) sur 0-20 cm selon les modes de gestion du sol...	26
Tableau 3: Distribution de la réserve utile et de l'écart type suivant le type d'horizon en 2012	27
Tableau 4: p-values du test t de Student à 5%.....	28
Tableau 5 : Résultats des humidités caractéristiques en situation de référence	V
Tableau 6 : Résultats des humidités caractéristiques en fonction des pratiques culturales.....	V
Tableau 7 : Résultats de la réserve utile sur le témoin NT-NS	VI
Tableau 8 : Réserve utile dans les différentes parcelles expérimentales.....	VI

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Paramètre du bilan hydrique de la zone racinaire.....	7
Figure 2 : Etat de l'eau dans le sol.....	8
Figure 3 : Les trois principaux types d'humidité du sol	9
Figure 4 : Localisation géographique du site expérimental Crop-News de Kamboinsé.....	14
Figure 5 : Moyenne mensuelle de la pluviométrie et cumul moyen sur 14 ans (2001 à 2014) à Kamboinsé.....	15
Figure 6 : Localisation des parcelles et profils pédologiques	17
Figure 7: Eléments constitutifs de la Presse à Membrane utilisée	20
Figure 8 : Echantillons de gravier prêts pour l'étuve (a) et éprouvette graduée (b)	22
Figure 9 : Séchage d'échantillons de gravier au soleil dans les tamis (a) et échantillons de gravier immergés dans l'eau contenue dans les barquettes d'aluminium (b).....	22
Figure 10: Evolution des humidités à la capacité au champ (pF3) et au point de flétrissement permanent (pF4,2) du mode de gestion témoin NT-NS	25
Figure 11 : Evolution temporelle (2012 à 2014) des humidités à la capacité au champ (pF3) et au point de flétrissement permanent (pF4,2) sur le site Crop-News.....	27
Figure 12: Evolution de la réserve utile (mm/m de sol) selon le type d'horizon	28
Figure 13: Réserve utile dans les différentes parcelles expérimentales en 2014	29
Figure 14 : Profil de distribution des graviers suivant la profondeur.....	30
Figure 15 : Distribution spatiale de la teneur en eau des graviers suivant la profondeur	30

I. INTRODUCTION

Dans les zones semi-arides tropicales (ZST), dont fait partie le Burkina Faso, le climat se caractérise par sa longue saison sèche (jusqu'à 8 mois) et par l'irrégularité interannuelle et spatio-temporelle de la pluviométrie durant la saison humide alors que l'agriculture demeure l'activité principale. Les cultures, conduites principalement sous régime pluvial, sont souvent soumises à des déficits hydriques de durée variable selon la quantité d'eau emmagasinée dans le sol (la réserve d'eau du sol) et la rapidité de son épuisement par la transpiration des plantes et l'évaporation du sol (évapotranspiration). Ce déficit hydrique, qu'il soit prolongé ou de courte durée, affecte inéluctablement et de manière négative la croissance et le développement des cultures (diminution de 20 à 30 jours) et par suite leur rendement (Nasta and Gates, 2013).

De manière générale, les sols cultivés peuvent réunir tous les facteurs et propriétés favorisant l'obtention de meilleurs rendements, mais leurs potentialités ne s'expriment réellement qu'avec des réserves hydriques suffisantes pouvant subvenir aux besoins en eau des cultures durant la totalité ou du moins durant les phases critiques de leur cycle végétatif. En ZST, bien souvent, les bonnes récoltes sont tributaires des années de bonne pluviométrie et la relation pluie-rendement devient de plus en plus évidente à mesure que le climat s'assèche. Ainsi, Pasquier (2000) rapporte que l'eau demeure le facteur limitant des productions en ZST vu qu'elle est le vecteur des éléments nécessaires à la croissance de la plante (transport des substances dans le sol et dans le végétal) et est source d'oxygène et d'hydrogène.

Les études de Slama (1989) ont montré qu'en absence de précipitations pour couvrir les besoins en eau des cultures, tout effort ou tentative d'amélioration de la productivité par l'apport de fertilisants (engrais) est inutile. Aussi ces études ont confirmé que les techniques culturales et la préparation adaptée des sols jouent un rôle favorable au stockage et à la conservation de l'eau dans la porosité capillaire du sol tout en luttant contre les adventices et en créant des conditions favorables à l'infiltration des eaux, qu'elles soient pluviales ou issues de l'irrigation, pour leur conservation à l'abri de l'évaporation. C'est dans ce contexte que plusieurs approches tendant à une meilleure conservation de l'eau dans la porosité capillaire du sol ont été développées. C'est le cas des programmes de recherche-développement tel que les projets ABACO et WASSA qui ont été initiés par le CIRAD, le 2iE et l'IRD (Lahmar et al., 2011 ; Cournac et al., 2015). En effet, ces deux projets cherchent à promouvoir les pratiques paysannes mises en œuvre dans la réhabilitation des sols dégradés, la conservation de l'eau dans le sol et les techniques de récupération des eaux et des sols. Cette démarche vise

à améliorer la connaissance de la dynamique de l'eau à travers l'association d'arbustes natifs (*Piliostigma reticulatum*) à une céréale (sorgho) (Lahmar et Yacouba, 2012).

Le dispositif Crop-News de Kamboinsé mis en place depuis 2012 repose sur une combinaison de plusieurs densités d'arbustes (0, 500, 1000 et 2000 à l'hectare) avec deux techniques de travail du sol (le *Zai* et le semis-direct manuel). L'un des objectifs majeurs décliné par les projets WASSA et ABACO, est la compréhension des transferts d'eau sur la zone non saturée au niveau dudit dispositif (Lahmar et Yacouba, 2012). Notre thème de recherche, partie intégrante de ces deux projets, a pour objectif de base l'étude de l'évolution temporelle des humidités caractéristiques et de la réserve utile des sols de ce dispositif expérimental.

Plus spécifiquement, on procédera à :

- ❖ L'établissement des profils des humidités caractéristiques et de la réserve utile des sols du dispositif ;
- ❖ L'étude de la contribution du mode de gestion des sols à leurs propriétés hydriques ;
- ❖ L'étude de la contribution des graviers à la constitution du stock d'eau du sol.

Pour y parvenir, l'étude s'est basée sur les données collectées sur le terrain et leurs analyses au laboratoire. Les humidités caractéristiques ont été déterminées pour chaque échantillon de sol grâce à la Presse à Membrane de Richards et constituent les paramètres de base pour la détermination de la réserve utile du sol. L'immersion des graviers dans l'eau et leur étuvage ont permis de déterminer leur contribution à la constitution du stock d'eau du sol.

Le présent travail est structuré en cinq grandes parties : la première partie résume la synthèse bibliographique tandis que la seconde partie regroupe l'ensemble des hypothèses et objectifs de cette étude. Quant à la troisième partie, elle concerne le matériel et les méthodes appliqués à cette recherche alors que la quatrième partie présente les résultats et leur interprétation. La dernière partie présente la conclusion, les recommandations et les perspectives de l'étude.

II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Bilan hydrique et réserve utile

Le bilan hydrique est utilisé pour évaluer la contrainte en eau dans la limite de la réserve utile maximale des sols. Selon Piedallu et al. (2012), Pasquier (2000), les apports en eau sur les sols sont matérialisés par les précipitations (R) et l'irrigation (I) qui s'ajoutent au stock d'eau dans le sol et les départs sont matérialisés par l'évapotranspiration (ET), l'évaporation des eaux de surface (E_o) (conditionnée par les températures et le rayonnement solaire), le drainage (N) et le ruissellement (O) (Figure 1). Lorsque les départs sont supérieurs aux apports, la réserve utile diminue. Cette dernière englobe la réserve facilement utilisable par les plantes (RFU). Les travaux de Gaume (2002) montrent que la réserve utile ne peut s'écouler gravitairement. Elle ne représente qu'entre 70 et 150 mm de l'eau du sol. Cette eau résiduelle peut du moins, dans les horizons explorés par les racines, être remobilisée par les plantes.

L'estimation de la capacité d'un sol à stocker de l'eau fait intervenir de nombreux facteurs : la texture, la structure, la composition chimique et la profondeur d'exploration du sol par les racines (Bruand et al., 1996). La réserve en eau utile permet d'intégrer un bon nombre de ces paramètres. Utilisée seule ou combinée avec d'autres facteurs, elle donne une bonne approximation de l'aptitude agronomique des sols et de l'intérêt de leur préservation dans le contexte du changement climatique. Ainsi la RU diffère d'un type de sol à un autre et d'un horizon à l'autre. Elle est d'environ 25 à 100 mm/m pour les sols sableux, de 100 à 175 mm/m pour les sols limoneux et 175 à 250 mm/m pour les sols argileux (Vereecken et al., 2014 ; Goulard et Voltz, 1994). Mais selon Ben et al. (2002), pour les sols peu évolués, elle est de 59,7 à 64,7 mm entre 0-20 cm, 52,4 à 60,2 mm entre 20-40 cm, 50,9 à 68,4 mm entre 40-60 cm, 45,7 à 66,7 mm entre 60-80 cm, 37,7 à 73,4 mm entre 80-100 cm et 39,8 à 65,4 mm entre 100-120 cm. Ils relatent donc que la réserve utile est plus élevée en surface qu'en profondeur dans les sols peu évolués. Le dispositif Crop-News de Kamboinsé qui fait l'objet de cette étude est mis en place sur les sols classés parmi les sols ferrugineux tropicaux peu évolués.

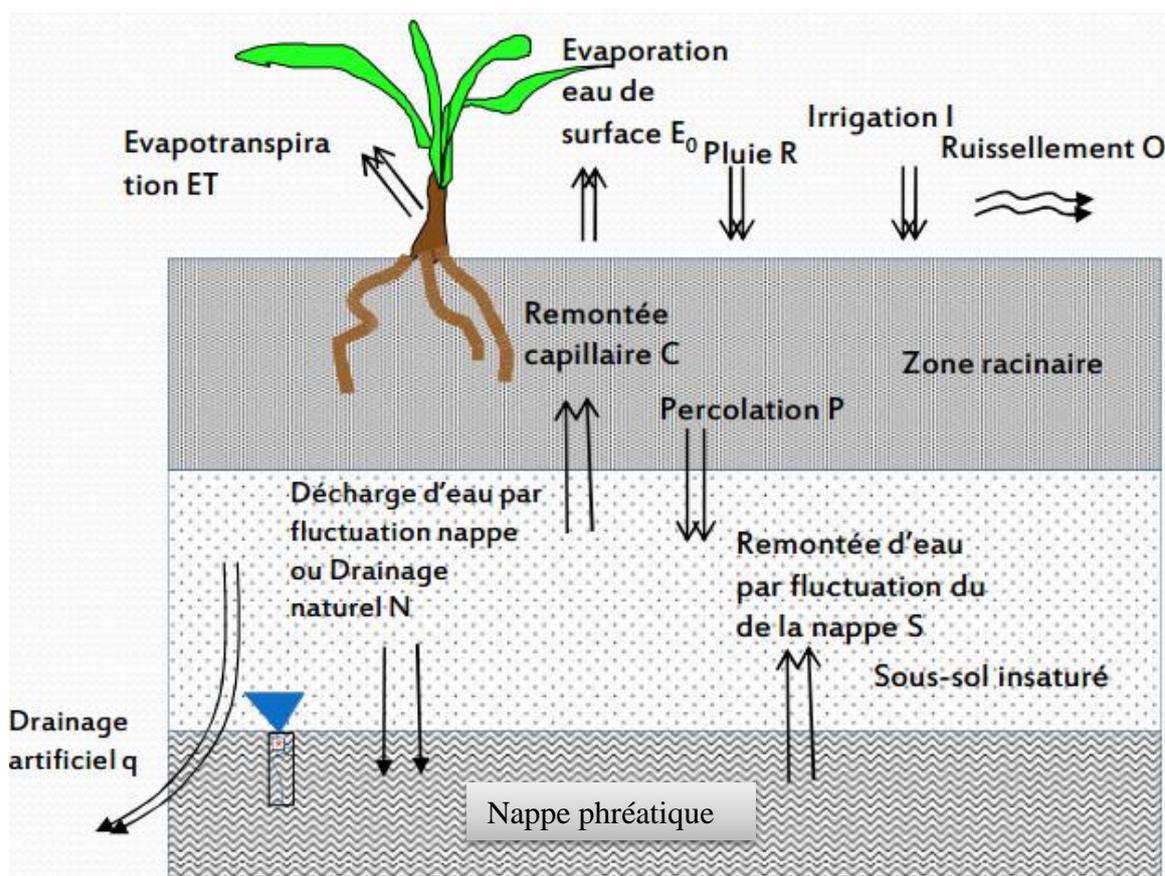


Figure 1 : Paramètre du bilan hydrique de la zone racinaire

Source : Keita (2014)

Ainsi, à travers cette Figure 1, le bilan hydrique sous la culture indiquée s'écrit comme suit :

$$\underbrace{I + S + C + R}_{\text{Entrée (mm)}} = \underbrace{E_0 + ET + N + O + P + q}_{\text{Sortie (mm)}} \quad (1)$$

2.2. Constitution du sol et notion d'humidité

Les deux principales sources d'eau dans le sol sont les précipitations et les apports par l'irrigation. Au contact du sol, l'eau s'infiltré en partie ou en totalité. Les études antérieures ont montré que l'eau infiltrée n'est pas figée. Elle est sujette à des mouvements horizontaux (Pachepsky et al., 2003) et verticaux (Barontini et al., 2013). Elle forme autour des éléments solides des films très fins. La teneur en eau du sol détermine le taux d'humidité caractéristique physique du sol (Pasquier, 2000). L'humidité du sol se réfère à l'eau présente dans la partie supérieure d'un sol et est une variable d'état contrôlée par un large éventail de processus écologiques (activités des êtres vivants au sein de leur milieu de vie et leurs différentes interactions), hydrologiques (dynamique de l'eau), géotechniques (phénomènes susceptibles de modifier le sol) et météorologiques (aléas climatiques) (Romano, 2014).

Selon Robinson et al. (2012), l'humidité du sol est une variable fondamentale de l'état hydrologique et son modèle spatial est important pour la compréhension des processus pédo-hydrologiques. D'une manière générale, les sols sont formés de particules solides, de tailles, de formes et de natures diverses, formant une matrice. La répartition en taille de ces particules permet de déterminer la texture ou granulométrie de ce sol. Ces particules, ne pouvant s'imbriquer parfaitement, créent du vide entre elles prenant le nom de porosités. Cette porosité peut être remplie par un fluide, généralement de l'eau ou de l'air. Le sol forme donc un milieu triphasique. Dans ce milieu, l'eau existe sous trois formes : i) eau absorbée difficile à extraire qui est liée aux éléments solides du sol (eau liée) ; ii) eau de rétention capillaire (retenue dans les microporosités) qui correspond à la réserve hydrique utilisable par les plantes ; iii) eau gravitaire ou libre (qui remplit les macroporosités, réalimente les nappes profondes ou les cours d'eau) dont les forces sont trop faibles pour s'opposer à l'action de la pesanteur (Figure 2).

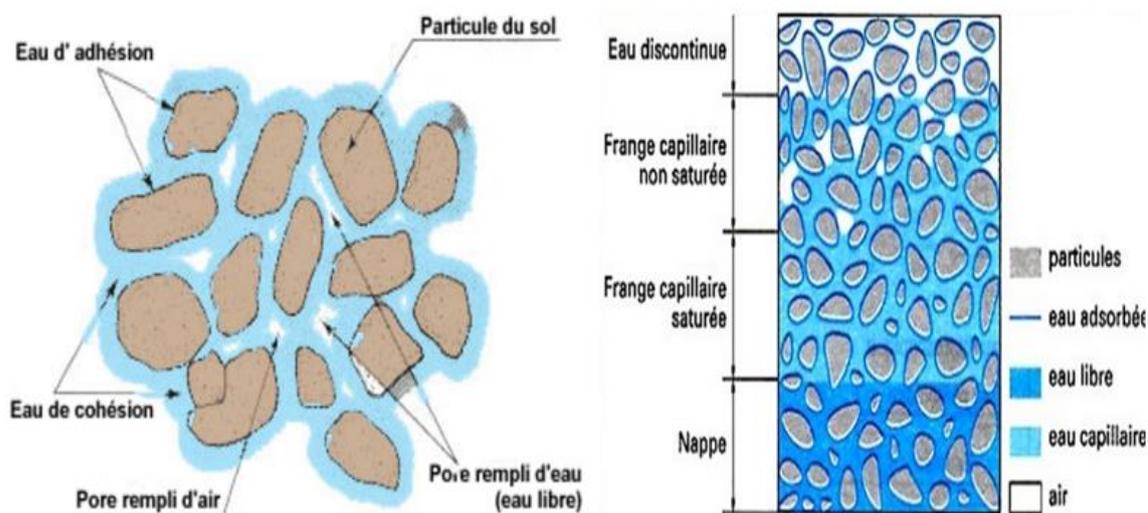


Figure 2 : Etat de l'eau dans le sol

Source : <http://fr.slideshare.net/fatehfateh/programme-de-mcanique-des-sols>

La quantité maximale d'eau libre se situe généralement entre 150 à 300 mm suivant les sols (Gaume, 2002). Trois types d'humidité interviennent dans l'appréciation des propriétés pédo-hydriques du sol à savoir :

❖ **Humidité à la capacité au champ : H_{cc}**

La teneur en eau à la capacité au champ indique l'humidité du sol observée après élimination de toute l'eau de gravité. L'eau disponible est retenue par la matrice solide sous l'effet des forces de capillarité et d'adsorption et ne peut donc s'écouler gravitairement. Néanmoins, la force de succion des plantes est supérieure à la force de rétention de l'eau par

le sol. L'eau résiduelle est donc disponible pour les besoins physiologiques des plantes. Les plantes se développent normalement car il y a aussi de l'air dans les pores (Figure 3a).

❖ **Humidité au point de flétrissement permanent : H_{pfp}**

Le point de flétrissement permanent correspond à l'humidité du sol au moment où la force de succion des plantes est égale à la force de rétention de l'eau par le sol (de l'ordre de 15 bars ou -15000 hPa). Le solde d'eau du sol n'est plus disponible pour les végétaux (apparition d'un flétrissement irréversible). Les plantes meurent par insuffisance d'eau (Figure 3b).

Lorsque tous les pores du sol sont saturés en eau, on parle de **l'humidité à saturation**. A ce moment, il n'y a plus d'air dans le sol. Les plantes peuvent donc mourir par asphyxie car dans le sol, les plantes ont besoin à la fois de l'eau et de l'air pour leur survie (Figure 3c).

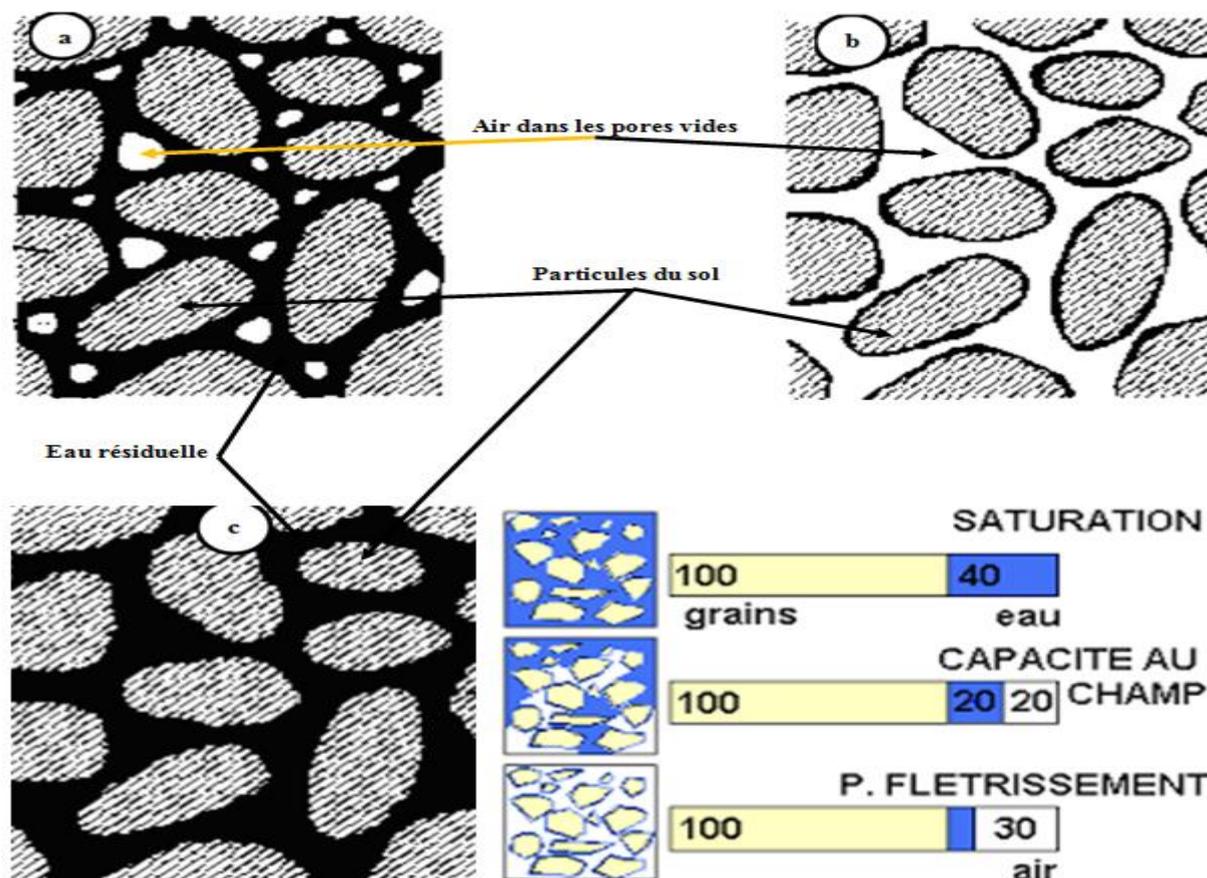


Figure 3 : Les trois principaux types d'humidité du sol

Source : -u-picardie.fr

Cette figure montre en haut à gauche la porosité qui contient de l'eau et de l'air. Ce qui correspond à la pastille du milieu ; en haut à droite, la porosité est occupée par l'air seul (pastille du bas) et en bas à gauche, la porosité est remplie d'eau uniquement (pastille du haut). Cette étude ne s'intéresse qu'au H_{cc} et au H_{pfp} du sol.

D'après Duchaufour (2004), H_{cc} est obtenue à $pF=2$ tandis que H_{pfp} est obtenue à $pF= 4,2$. Dans la littérature, on constate que beaucoup d'auteurs n'hésitent pas à remettre en cause ces valeurs en utilisant des pF compris entre 1 et 2 pour estimer H_{cc} (Trouche et Morlan, 1997). En effet, le potentiel hydrique à la capacité au champ varie selon la texture du sol considéré. Il est généralement admis que la teneur en eau à $pF=2$ ($\Psi= -100$ hPa) peut être considérée comme une approximation de la H_{cc} (Bruand et al., 1996). La force de succion au point de flétrissement permanent semble, quant-à-elle, faire l'unanimité (15 bars, soit $pF=4.2$), bien qu'en réalité elle dépend des capacités de succion racinaire de l'espèce végétale considérée. Dans la pratique, une succion de 15 bars au point de flétrissement permanent est valable pour la plupart des plantes cultivées ou forestières.

2.3. Méthodes de détermination des humidités caractéristiques du sol

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes qui permettent de déterminer les humidités caractéristiques du sol. Quelques-unes d'entre elles sont présentées comme suit :

❖ Les fonctions de Pédotransfert (FPT)

Les fonctions de pédotransfert (FPT) recommandées par Bouma et Van Lanen (1987) permettent de prédire les capacités de rétention en eau des sols à partir des caractéristiques plus aisément mesurables comme la texture, la densité apparente, la teneur en matière organique. On distingue deux types de FPT :

- ✓ Les Fonctions de Pédotransfert Continue (FPTC) : elles permettent une prédiction des propriétés de rétention en eau en rendant compte de façon continue de la variation des propriétés du sol. Il s'agit d'équations obtenues par régression multilinéaire permettant de relier les propriétés hydriques des sols à des propriétés plus simples à mesurer ;
- ✓ Les Classes de Fonction de Pédotransfert (CFPT) attribuent des propriétés de rétention en eau en regroupant les sols dans des classes de texture et parfois dans des sous classes (type d'horizon). Les CFPT sont de simples jeux de valeurs moyennes attribuant à chaque classe une teneur en eau.

La littérature montre une grande utilisation des fonctions de pédotransfert (Al Majou et al., 2007). Cependant si une fonction de pédotransfert a été déterminée dans un contexte précis de pédogénèse et ou de matériau, elle sera précise et peu biaisée si on l'utilise dans le même pédoclimat. Inversement, employée dans un contexte différent, elle conduira à des estimations potentiellement biaisées. En revanche, si une fonction de pédotransfert a été

établie à partir d'un grand nombre de sols différents couvrant de larges territoires et des conditions pédoclimatiques variées, elle sera utilisable sur une vaste zone et sur une grande diversité de sol mais elle sera alors peu précise.

❖ Méthodes rétractométriques

L'analyse au rétractomètre permet de mesurer le retrait des échantillons de sols préalablement humidifiés par capillarité dans un bac de sable. Lorsque l'échantillon est argileux, on étudie le départ d'eau à 28-30°C pendant 72 heures au maximum. Le rétractomètre permet de suivre en continu la variation de volume et de poids de laquelle on déduit la variation de la teneur en eau à la capacité au champ et celle au point de flétrissement permanent (Braudeau et Zidi, 1998). Elle a comme avantage de rendre compte de l'organisation du sol non perturbé et est spécifique à l'échantillon de sol et à son comportement lors de la phase de retrait.

❖ Méthode d'application des diverses pressions

Cette méthode est utilisée pour déterminer les humidités caractéristiques des échantillons de sol au laboratoire en exerçant une pression à chaque type de texture de sol (Morel, 1989) : i) terres argileuses : 1 bar ($pF = 3$), ii) terres limoneuses : 0,33 bar ($pF = 2,5$), iii) terres sableuses : 0,1 bar ($pF = 2$) pour connaître le H_{cc} . Pour le H_{pfp} , il est admis une pression de 15 bars ($pF = 4,2$). Ces pressions sont exercées grâce à la Presse à Membrane de Richards (PMR). C'est cette méthode de détermination des humidités caractéristiques qui a été utilisée dans cette étude pour les analyses de la terre fine, matériau dont cet appareil permet d'analyser.

2.4. Travail du sol et son influence sur les propriétés hydriques des sols

La conservation de l'eau est un paramètre important de la qualité du sol. Bien souvent, ce paramètre constitue un facteur limitant de la productivité agricole. C'est pourquoi le choix d'une technique de travail du sol repose sur son aptitude à permettre au sol de stocker l'eau et la rendre disponible aux racines particulièrement dans les climats à faible pluviométrie.

Plusieurs travaux rapportent que le non labour améliore les propriétés de rétention en eau du sol en comparaison avec les techniques conventionnelles. Abdellaoui et al. (2011) par exemple, pour mettre en évidence l'effet de trois techniques de travail du sol à savoir le semis direct, le travail minimum et le travail conventionnel sur la conservation de l'eau du sol, ont mesuré les humidités du sol au cours du cycle végétatif du blé dur au niveau de l'horizon superficiel (considéré entre 0 et 20cm). Ainsi, ils ont trouvé que le semis direct et les

techniques simplifiées permettent une meilleure rétention en eau par rapport au labour conventionnel avec la charrue à socs. Ces études leur ont permis de conclure que le sol en techniques simplifiées et en semis direct retient un peu plus d'humidité en profondeur (20-40 cm) qu'en horizon superficiel (0-20 cm). Cette affirmation est partagée par Nouiri et al. (2004) et par Bourguignon (2004).

Dans cette même perspective, Ma et al. (2013) ont effectué, dans la plaine nord en Chine des travaux par rapport à la maîtrise de l'eau du sol. Ces travaux ont montré que les pratiques agricoles concourant à la gestion durable telles que le paillage ou mulch, la jachère et l'amendement du sol sont essentielles et significatives à l'atténuation de l'épuisement rapide des ressources en eaux du sol.

Dans nos régions, à part le semis direct, le travail minimum et le travail conventionnel du sol, plusieurs autres approches ont été développées pour améliorer la rétention de l'eau du sol et l'atténuation de son épuisement rapide. Il s'agit entre autre du Zai et du mulch ou paillage (Roose et al., 1999). Le premier qui consiste à faire de petits trous sur la parcelle a comme avantage de recueillir les eaux de pluie et de ruissellement et de les laisser s'infiltrer tout en protégeant les semences et la matière organique. Le deuxième consiste à couvrir le sol d'une couche de matière organique de qualité variée et a l'avantage d'améliorer la structure du sol, de réduire l'évaporation et d'augmenter l'infiltration. Ces techniques sont celles mises en place sur le site expérimental Crop-News de Kamboinsé.

La modernisation de l'agriculture (agriculture mécanisée) n'est pas sans effet sur les propriétés hydriques du sol. En effet, le poids de plus en plus important de machines agricoles aggrave le risque de compactage du sous-sol, un phénomène persistant qui rend difficile les processus de relâchement naturel. Une étude a évalué et quantifié les effets du compactage du sous-sol sur la structure des pores (élément traduisant la capacité de stockage de l'eau dans le sol) à 30, 50, 70 et 90 cm de profondeur. La rétention d'eau, la perméabilité à l'air et la diffusivité des gaz ont été mesurées. Il ressort que le matériel agricole utilisé peut compacter le sol jusqu'à 90 cm de profondeur réduisant ainsi le volume des pores donc diminution du pouvoir de stockage des fluides du sol. Aussi, l'effet du compactage peut persister pendant au moins 14 ans (Berisso et al., 2012). Les travaux de Hölzel et al. (2013) leur ont permis de confirmer que les zones compactées par des machines agricoles (Bulldozer par exemple) constituent des obstacles hydrauliques et entravent le flux d'eau du sous-sol, alors que les zones non-compactées sont des domaines ayant une capacité accrue de stockage d'eau.

III. HYPOTHESES ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

3.1. Hypothèses de travail et question de recherche

Les hypothèses de recherche de la présente étude sont présentées ci-dessous :

- ❖ **Hypothèse 1** : Le système de culture adopté et les pratiques culturales associées améliorent les propriétés hydriques du sol ;
- ❖ **Hypothèse 2** : Les graviers présents en forte quantité dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés contribuent peu à la rétention de l'eau dans le sol.

A travers ces hypothèses, la question de recherche de cette étude est formulée comme suit : « **les modes de gestion des sols du site expérimental Crop-News de Kamboinsé améliorent-ils les propriétés hydriques du sol dudit site** »?

Pour pouvoir mieux suivre et caler les idées en vue de mener à bien cette étude, il convient de présenter les objectifs à atteindre.

3.2. Objectifs de l'étude

3.2.1. Objectif général

L'objectif général de la présente étude consiste à étudier l'évolution temporelle des humidités caractéristiques et de la réserve utile des sols du dispositif expérimental Crop-News sur le site de Kamboinsé –Burkina Faso.

Trois objectifs spécifiques (OS) émanent de cet objectif général.

3.2.2. Objectifs spécifiques

Notre étude cherchera spécifiquement à :

- ❖ **OS 1** : Etablir les profils des humidités caractéristiques et de la réserve utile des sols ;
- ❖ **OS 2** : Etudier la contribution du mode de gestion des sols sur leurs propriétés hydriques après deux ans de mise en place de ces modes ;
- ❖ **OS 3** : Etudier la contribution des graviers à la constitution du stock d'eau du sol.

Pour atteindre ces objectifs, un certain nombre de matériel a été utilisé et différentes méthodologies ont été retenues et adoptées selon le type d'analyse à effectuer. Ce sont ce matériel et ces méthodologies qu'il convient de présenter dans la partie suivante.

IV. MATERIEL ET METHODES

4.1. Présentation du site et dispositif expérimental

4.1.1. Localisation géographique et caractérisation pédoclimatique du site expérimental

❖ **Localisation du site :** Le site expérimental Crop-News est localisé au sein de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) sur son site de Kamboinsé (site K3), village situé à une vingtaine de kilomètres de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso, dans la province de Kadiogo, sur l'axe Ouagadougou-Kougoussi. Il est localisable à travers la Figure 4.

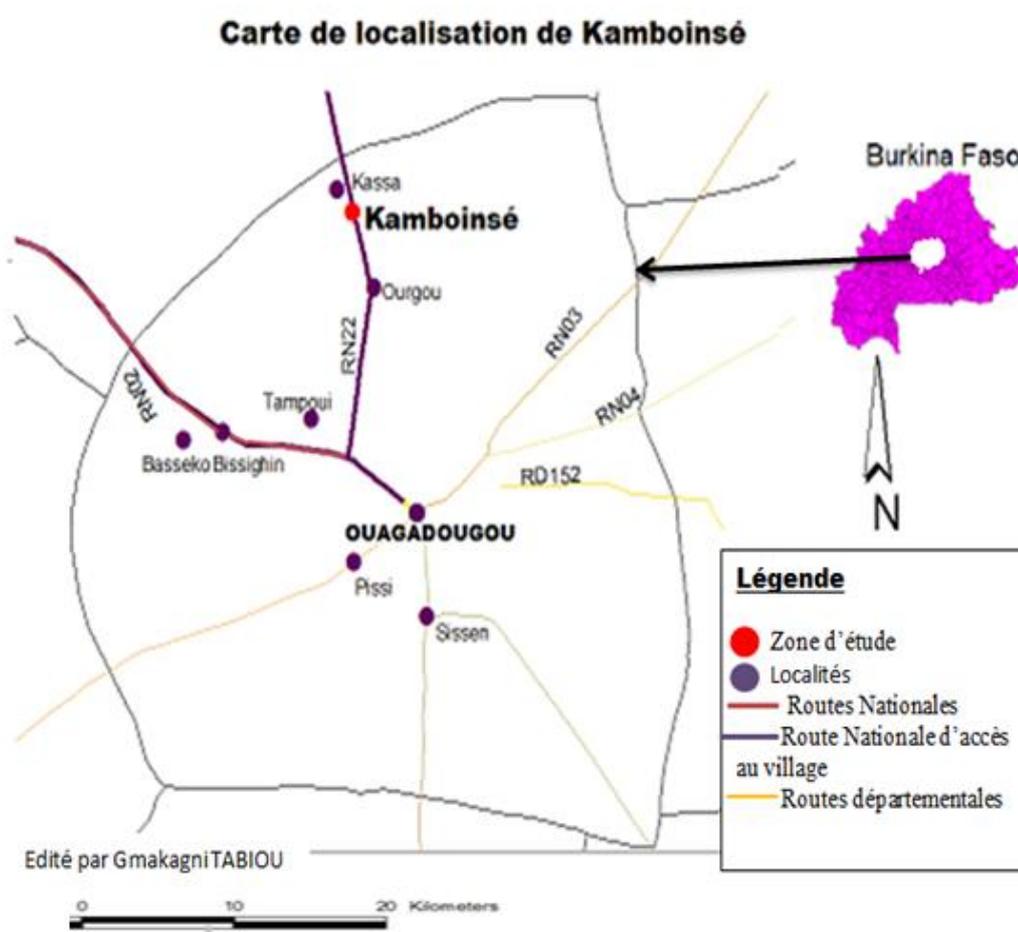


Figure 4 : Localisation géographique du site expérimental Crop-News de Kamboinsé

Une fois arrivé dans ce village et au sein du K3, le site expérimental Crop-News est géoréférentiable à travers les coordonnées suivantes : Longitude = $12^{\circ}27'59.86''N$ et latitude = $1^{\circ}32'57,14''O$ (en Degré, Minute et Seconde) (INERA, 2014).

❖ **Le climat :** Ledit site, selon INERA (2014), situé dans la zone soudano-sahélienne est caractérisé par un climat tropical avec deux saisons principales :

- i) la saison pluvieuse, qui va de juin à septembre, est marquée par des vents humides de la mousson et les hauteurs de pluies enregistrées sont rarement supérieures à 900 mm par an. Les plus grandes quantités de pluies sont enregistrées dans les mois de juillet et d'août avec respectivement 165,5 mm et 241,4 mm en 2013 ; 175,4 mm et 275,6 mm en 2014. La pluie annuelle dans ce village est variable d'une année à l'autre (cumul annuel en 2013 est de 673,2 mm et celui de 2014 est de 852,9 mm) ;
- ii) la saison sèche, la plus longue (08 mois), va d'octobre à mai et est dominée par les vents d'harmattan.

La Figure 5 montre la moyenne de la pluviométrie des 14 dernières années à Kamboinsé.

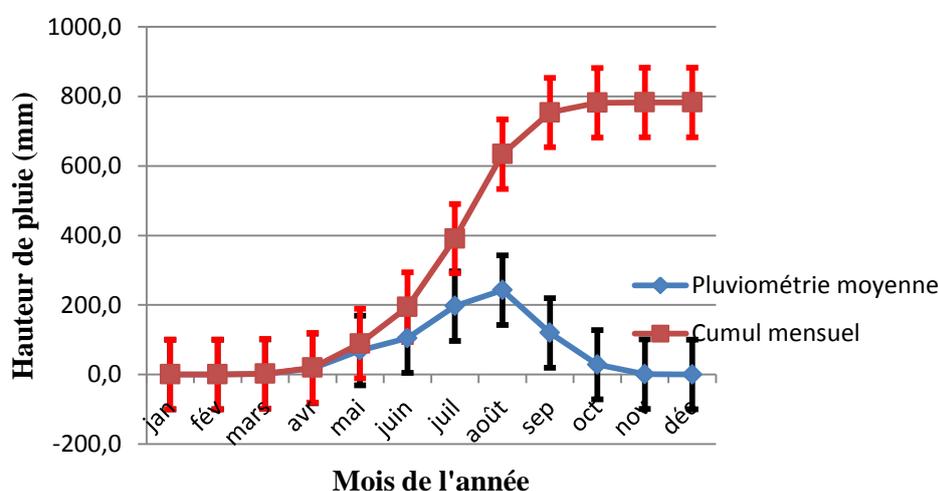


Figure 5 : Moyenne mensuelle de la pluviométrie et cumul moyen sur 14 ans (2001 à 2014) à Kamboinsé

Les températures sont élevées entre mars et avril et faibles entre décembre et janvier. Les maximales sont autour de 40°C et les minimales autour de 27°C. La température dans le mois le plus pluvieux (août) est autour de 32°C (INERA, 2014).

❖ **Les sols :** Le site est dominé par les sols ferrugineux tropicaux lessivés de type sableux-limoneux reposant sur une grande masse de cuirasse ferrugineuse. Ce sont des sols peu évolués, pauvres, fragiles et par conséquent vulnérables à l'érosion. Ils sont recouverts d'une couche sableuse, par endroits, d'épaisseur faible (0 à 40 cm). Compte tenu de l'affleurement de la cuirasse par endroits, la profondeur d'enracinement est très variable et dépend de la position de cette cuirasse (INERA, 2014).

❖ **La végétation :** Typique aux zones rurales, le couvert végétal quant à lui est dominé par une savane arborée ou arbustive parsemée de quelques grands arbres tels que le Karité (*Vitellaria paradoxa*), le Néré (*Parkia biglobosa*), le Baobab (*Adansonia digitata*), le Neem (*Azadirachta indica*) et le Kapokier (*Bombax constatum*). Les arbustes sont dominés par le *Piliostigma reticulatum* et une strate herbacée assez dense (*Schizachyrium exile*, *Andropogon gayanus*) dans les zones de jachère ou non défrichées. La litière est souvent absente du fait de la minéralisation de la matière organique due au régime climatique de type tropical, mais aussi à cause des fréquents feux de brousse et des méthodes traditionnelles de culture sur brûlis. Cette végétation est aussi clairsemée du fait de son exploitation intense pour les besoins domestiques (bois de chauffe et fourrage pour les animaux). Le barrage présent dans le village de Kamboinsé est bordé de savane boisée (INERA, 2014).

4.1.2. Description du dispositif expérimental Crop-News

Le dispositif expérimental Crop-News est constitué de vingt-six parcelles disposées en quatre blocs comme l'illustre la Figure 6. Chaque parcelle a les dimensions de 20m x 13,60m. Elles font l'objet de l'application d'un mode de gestion du sol dans lequel les pratiques culturales Zaï ou semis direct manuel sont associées à une densité de 0, 500, 1000 ou 2000 plants de *Piliostigma reticulatum* à l'hectare. Ces parcelles font aussi l'objet du paillage ou mulch avec les débris végétaux issus des récoltes du Sorgho. A ces modes de gestion s'ajoute la situation de référence correspondant aux caractéristiques hydriques du sol avant la mise en place du dispositif Crop-News. Les différents modes de gestion du sol sur le site sont :

NT-NS: Sans Zaï et sans *Piliostigma reticulatum* (0 arbustes à l'hectare) représentant le témoin ;

Z-NS: Zaï sans *Piliostigma reticulatum* (0 arbustes à l'hectare);

NT-LSD: Sans Zaï avec faible densité de *Piliostigma reticulatum* (500 arbustes à l'hectare);

Z-LSD: Zaï avec faible densité de *Piliostigma reticulatum* (500 arbustes à l'hectare);

Z-HSD: Zaï avec forte densité de *Piliostigma reticulatum* (2000 arbustes à l'hectare);

NT-HSD: Sans Zaï avec forte densité de *Piliostigma reticulatum* (2000 arbustes à l'hectare);

Z-MSD : Zaï avec moyenne densité de *Piliostigma reticulatum* (1000 arbustes à l'hectare).

Pour l'étude de l'impact de chaque mode de gestion sur les propriétés hydriques du sol, neuf parcelles ont été échantillonnées dans le cadre de cette étude. Ces parcelles en paire par bloc et situées à proximité des profils, peuvent être identifiées par les indices portés sur chacune d'elle comme le montre la Figure 6. Cette technique d'échantillonnage a été faite de sorte à pouvoir comparer l'évolution temporelle de la réserve hydrique du sol des profils pédologiques à celle des parcelles expérimentales.



Z-NS: Zaï-No shrub = Zaï sans *Piliostigma reticulatum*

NT-LSD: No tillage-Low shrub density = sans Zaï avec faible densité de *Piliostigma reticulatum*

Z-LSD: Zaï - Low shrub density = Zaï avec faible densité de *Piliostigma reticulatum*

Z-HSD: Zaï-High shrub density = Zaï avec forte densité de *Piliostigma reticulatum*

NT-HSD: No tillage -High shrub density = sans Zaï avec forte densité de *Piliostigma reticulatum*

Z-MSD : Zaï-midium shrub density = Zaï avec moyenne densité de *Piliostigma reticulatum*

Figure 6 : Localisation des parcelles et profils pédologiques

4.2. Détermination des humidités caractéristiques et de la réserve utile

On s'intéresse ici à la fraction fine du sol, c'est-à-dire les particules du sol dont la taille est inférieure à 2 mm. La détermination des humidités caractéristiques du sol s'est effectuée au laboratoire sur des échantillons remaniés au moyen de la Presse à Membrane de Richards (PMR) de type 08.03 pouvant supporter des pressions entre 1 bar (pF3) et 15 bars (pF4,2). Trois (03) répétitions ont été effectuées par échantillon afin de déterminer l'humidité moyenne.

4.2.1. Prélèvement des échantillons de sol et conditionnement

Pour la mise en œuvre des analyses en vue de la détermination des humidités caractéristiques, des échantillons de sol ont été prélevés à deux périodes différentes :

- ❖ La première période concerne l'année 2012 durant laquelle les échantillons ont été prélevés sur sept (07) profils (Figure 6). Les profondeurs échantillonnées varient selon le nombre d'horizons isolés par profil et peuvent atteindre 150 cm sur certains profils lorsque la cuirasse latéritique n'est pas une contrainte (Tableau 1). Cette année constitue la situation de référence puisque le dispositif expérimental n'est pas encore mis en place ;
- ❖ La deuxième période concerne l'année 2014 durant laquelle les échantillons ont été prélevés au moyen d'une tarière sur une profondeur de 20 cm dans les parcelles soumises aux modes de gestion du sol ou pratiques culturales adoptées dans le dispositif expérimental Crop-News. En deux ans, le changement de la structure du sol n'affectera significativement que les premiers horizons du sol et explique ainsi le choix des 20 premiers centimètres du sol représentant la couche arable. Cet échantillonnage a concerné cinq (05) modes de gestion du sol sur neuf (09) parcelles comme le montre la Figure 6. Le Z-MSD n'a pas été échantillonné parce qu'aucun profil n'a été installé pour la comparaison par rapport à la situation de référence.

Les échantillons prélevés ont été tamisés à 2 mm puis ensachés et étiquetés pour leur utilisation au laboratoire (Annexe 1). Le refus essentiellement constitué de graviers a été conservé pour la détermination des humidités de ces graviers afin d'évaluer leur contribution à la constitution de la réserve en eau du sol.

Tableau 1 : Profondeurs échantillonnées par profil en 2012

Profil	Pratique culturale à proximité	Profondeur explorée (cm)	Epaisseur (cm)
1	NT-LSD et Z-LSD	0 – 20	20
		20 – 40	20
		50 – 80	30
2	NT-LSD et Z-LSD	0 – 10	10
		10 – 35	25
		60 – 100	40
3	Z-HSD et NT-HSD	0 – 10	10
		10 – 40	30
		50 – 100	50
		100 – 150	50
4	NT-HSD et Z-NS	0 – 15	15
		20 – 35	15
		50 – 60	10
		100 – 120	20
6	NT-HSD	0 – 15	15
		25 – 40	15
		45 – 60	15
		100 – 130	30
7	NT-HSD	0 – 12	12
		12 – 22	10
		25 – 40	15
		40 – 60	20
		60 – 95	35
		110 – 130	20
8	Entre les Rhizotrons R7, R8, R9, R10, R11 et R12	0 – 20	20
		20 – 35	15
		35 – 40	5
		40 – 57	17
		57 – 63	6
		63 – 100	37
		100 – 150	50

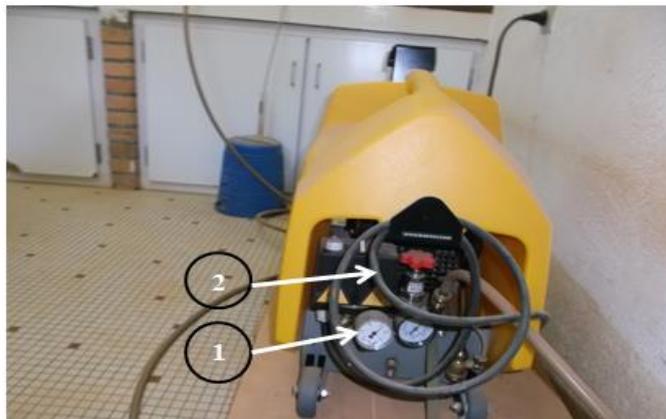
4.2.2. Protocole de détermination des humidités caractéristiques et de la réserve utile

Le protocole adopté a été celui de ORSTOM / IRD (ORSTOM-IRD, 1993) dont la description se trouve en Annexe 2. Pour la mise en œuvre de ce protocole, certaines tâches ont été adaptées à la spécificité de la presse à membrane utilisée dans le cadre de cette étude dont les caractéristiques sont présentées sur la Figure 7. Le reste du matériel utilisé pour les analyses est présenté en Annexe 3.



Légende

- 1= Le manomètre
- 2= La membrane cellophane
- 3= Les régulateurs de pression à l'entrée et à la sortie
- 4= Dispositif renfermant les joints d'étanchéité
- 5= Couvercle
- 6= Tuyauterie d'alimentation de la marmite en pression
- 7= Support ou garniture métallique de l'appareil
- 8= Manivelle de fermeture/ouverture du couvercle



Légende

- 1 = Manomètre de régulation de pression de l'entrée
- 2 = Câble d'alimentation électrique

Figure 7: Eléments constitutifs de la Presse à Membrane utilisée

❖ Préparation des échantillons

La préparation des échantillons regroupe des opérations qui ont été effectuées en aval de leur mise sous pression. Les principales opérations effectuées se résument comme suit :

- ✓ Lavage des assiettes devant contenir les échantillons de sol à l'eau de robinet puis rinçage à l'eau déminéralisée ;
- ✓ Etiquetage des assiettes conformément aux étiquettes des échantillons ;
- ✓ Transvasement des échantillons de sol dans les assiettes étiquetées ;
- ✓ Saturation des échantillons à l'eau déminéralisée sans agitation ni malaxage. Cette saturation peut prendre plusieurs jours selon la texture du sol. Dans le cadre de notre étude, elle a été effectuée pendant 4 jours par série d'échantillons compte tenu de la texture sablo-limoneuse ;
- ✓ Au 4^e jour, les échantillons ont été bien malaxés à l'aide d'une spatule ;
- ✓ Etiquetage des anneaux devant contenir les échantillons.

❖ Mise sous pression

Durant cette phase, les échantillons placés dans les anneaux étiquetés ont été soumis successivement à deux (02) pressions : 1 bar et 15 bars permettant la détermination respective des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Le suivi de la pression manométrique a été effectué journalièrement. L'extraction totale d'eau des échantillons est obtenue une fois que l'équilibre de pression a été atteint. Cet équilibre correspond au jour où le suintement a cessé soit trois à quatre jours pour nos échantillons. Une fois l'équilibre atteints, une dépressuration est effectuée et les échantillons sont retirés de l'extracteur puis emballés dans du papier aluminium pour leur passage à l'étuve à 105°C pendant 48 heures.

❖ Obtention des humidités pondérales (H_p) des échantillons après étuvage

Avant le passage des échantillons à l'étuve, leur masse humide (M_h) a été mesurée à l'aide d'une balance électronique de précision (0,001g). Après leur séjour pendant 48h à 105°C à l'étuve, les échantillons ont été retirés et leur masse sèche (M_s) a été mesurée. Ainsi, les humidités à la capacité au champ (H_{cc}) et au point de flétrissement permanent (H_{pfp}) ont été déterminées à partir de l'équation (2) :

$$H_p(\%) = \frac{M_h(g) - M_s(g)}{M_s(g)} \times 100 \quad (2)$$

Ces humidités caractéristiques ont été utilisées pour la détermination de la réserve utile (RU) à travers l'équation (3) :

$$RU(mm) = (H_{cc} - H_{pfp}) \times da \times z \quad (3)$$

Où z (dm) est l'épaisseur de la couche considérée, da (g/cm^3) est la densité apparente.

La densité apparente a été déterminée sur des échantillons de sol non remaniés au moyen d'un cylindre de densité (100 cm^3) sur des couches d'épaisseurs de 10 cm.

4.3. Détermination des humidités des graviers et méthode d'estimation de leur contribution à la constitution de la réserve en eau du dispositif Crop-News

Cette présente partie vise à étudier la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol. Celle-ci permettra de vérifier l'**hypothèse 2** formulée dans le cadre de cette étude.

4.3.1. Matériel

Le matériel utilisé pour cette analyse est composé de :

- ✓ Échantillons de graviers (Figure 8a) issus du refus obtenu lors du tamisage à 2 mm ;
- ✓ Étuve réglée à 105°C ;
- ✓ Balance de précision ;
- ✓ Éprouvette graduée de 500 ml (0,01ml) pour la détermination du volume des graviers par déplacement de volume d'eau (Figure 8b) ;
- ✓ Tamis de maille inférieure à 2 mm pour le séchage (Figure 9a) ;
- ✓ Barquettes en aluminium pour la saturation des échantillons (Figure 9b).



Figure 8 : Echantillons de gravier prêts pour l'étuve (a) et éprouvette graduée (b)



Figure 9 : Séchage d'échantillons de gravier au soleil dans les tamis (a) et échantillons de gravier immergés dans l'eau contenue dans les barquettes d'aluminium (b)

4.3.2. Description du protocole

❖ Mode opératoire

Les différentes étapes suivies pour la détermination des humidités des graviers sont décrites ci-après :

- ✓ Lavage à l'eau de robinet de 150 g de graviers contenus dans un tamis jusqu'à disparition de la couleur ocre puis passage à l'étuve pendant 48h à 105°C ;
- ✓ Mise en l'eau de l'éprouvette pour un volume $V_1=250$ mm ;
- ✓ Retrait successif des échantillons de l'étuve et leur refroidissement à l'air libre ;
- ✓ Pesée d'environ $P_1 = 100$ g des échantillons étuvés après tarage du contenant ;
- ✓ Immersion des 100g de graviers dans l'éprouvette remplie à 250 mm. Cette immersion a provoqué le déplacement d'un volume V_2 (mm) d'eau. Ainsi, le volume du gravier V_g (mm) a été déterminé par l'équation (4) :

$$V_g = V_2 - V_1 \quad (4)$$

- ✓ Transvasement du contenu de l'éprouvette dans une barquette d'aluminium portant le numéro de l'échantillon immergé ;
- ✓ Immersion totale de graviers pendant 24 heures puis transvasement du contenu de la barquette dans le tamis de maille inférieure à 2 mm pour leur séchage au soleil tout en remuant doucement à la main de façon à ce que ce séchage soit homogène ;
- ✓ Dès que toute la surface des graviers est sèche, l'échantillon est pesé : soit P_2 la masse obtenue. Ainsi, la quantité d'eau retenue par l'échantillon (P_w) est déterminée au moyen de l'équation (5).

$$P_w(g) = P_2(g) - P_1(g) \quad (5)$$

Pour éviter l'humidification des échantillons par échange thermodynamique, les manipulations ont été réalisées dans un endroit sec.

4.3.3. Méthode de détermination de la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau des sols du dispositif Crop-News

Avant d'étudier la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol, il a été procédé à la détermination des humidités pondérales (H_{pg}) et volumiques (H_{vg}) à partir des équations (6) et (7).

$$H_{pg} (\%) = \frac{P_w}{P_1} \times 100 \quad (6)$$

$$H_{vg} (\text{cm}^3/\text{cm}^3) = \frac{P_w}{V_g} \quad (7)$$

Ensuite, un profil montrant la proportion des graviers suivant la profondeur a été établi afin d'évaluer le poids des graviers dans la réserve en eau du sol. Ce profil a été utilisé pour analyser sur la base des humidités pondérales des graviers, leur contribution à la constitution de la réserve en eau du sol. Ainsi, la contribution "x" des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol a été déterminée par l'équation (8):

$$x = H_{pg} \times p_g \quad (8)$$

Où H_{pg} la teneur en eau des graviers, p_g la proportion de graviers dans la masse totale du sol tamisé.

4.4. Analyse statistique

Les données d'humidité ont été traitées sous le tableur Excel en vue de générer des tableaux et des graphes. Des statistiques descriptives comme la moyenne et l'écart type ont été calculées pour chaque mode de gestion du sol afin de faciliter les analyses comparatives et d'étudier la variabilité des humidités. Pour l'analyse de l'impact du mode de gestion du sol sur ses propriétés hydriques, un test de signification a été réalisé. Le test utilisé à cet effet est le test t de Student sous un intervalle de confiance de 95%.

Ainsi, les humidités caractéristiques et la réserve utile obtenues sous chaque mode de gestion du sol ont été comparées graphiquement et leur différence significative a été testée au seuil de 5%.

V. RESULTATS ET DISCUSSION

Cette partie présente la synthèse des résultats et discussions de l'évolution des humidités caractéristiques et de la réserve utile obtenues sous chaque mode de gestion du sol. Les résultats ont été subdivisés en trois parties : une première partie dans laquelle les humidités caractéristiques ont été analysées est suivie d'une deuxième partie analysant l'évolution de la réserve utile. Dans la troisième partie, la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol du dispositif expérimental Cop-News a été étudiée.

5.1. Evolution des humidités caractéristiques selon le mode de gestion du sol

Les humidités caractéristiques ont été analysées aussi bien sur les profils incorporant les caractéristiques initiales du sol du site expérimental que sur les parcelles soumises à un mode de gestion du sol.

5.1.1. Humidités caractéristiques sur le témoin NT-NS en 2012

L'évolution de l'humidité à la capacité au champ (pF3) et au point de flétrissement permanent (pF4,2) par profil en fonction des horizons est représentée à la Figure 10. L'analyse montre que les humidités caractéristiques ont augmenté avec la profondeur quel que soit le profil à l'exception du profil 8 qui présente des valeurs plus faibles sur les horizons 57-63 et 63-100 cm (Tableau 5 en Annexe 4). L'humidité à la capacité au champ a varié de 8% dans les horizons superficiels à 28% dans les horizons profonds alors que celle au point de flétrissement permanent a varié entre 3 et 18% pour les mêmes horizons.

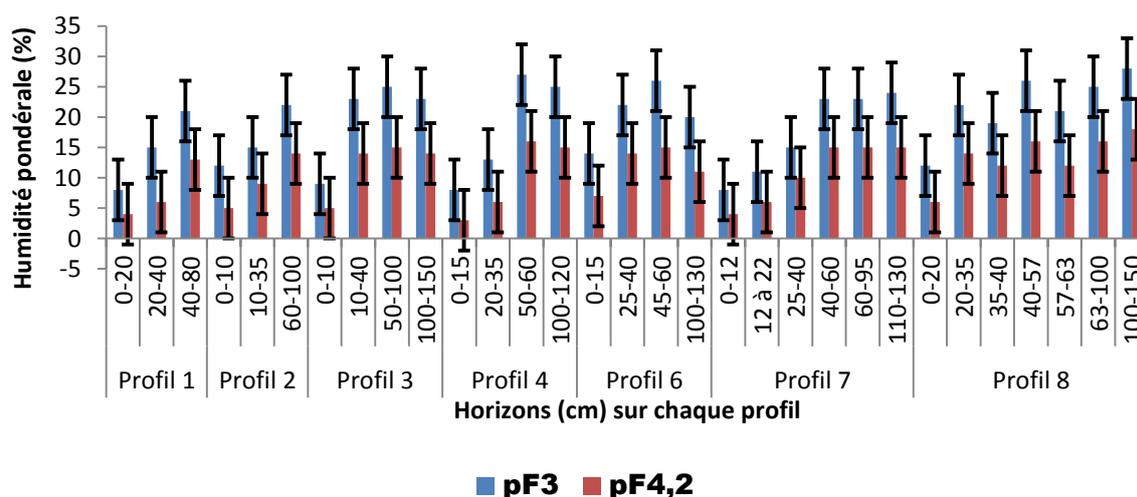


Figure 10: Evolution des humidités à la capacité au champ (pF3) et au point de flétrissement permanent (pF4,2) du mode de gestion témoin NT-NS

L'ensemble des profils présentent une évolution uniforme des humidités caractéristiques selon les profondeurs. Dans les 60 premiers centimètres du sol correspondant à la zone de forte activité racinaire, l'humidité à la capacité au champ a été de 17% en moyenne pour un écart type de 6% contre une humidité au point de flétrissement permanent de 10% en moyenne avec un écart type de 5%.

5.1.2. Humidités caractéristiques dans les parcelles expérimentales en 2014

Deux ans après la mise en place du dispositif expérimental Crop-News, les résultats de l'analyse des échantillons collectés dans les parcelles sous un mode de gestion du sol à des profondeurs de 0-10 cm et 10-20cm sont présentés dans le Tableau 6 en Annexe 4. Le Tableau 2 présente le récapitulatif par mode de gestion sur les 20 premiers centimètres.

Tableau 2 : Humidités caractéristiques (%) sur 0-20 cm selon les modes de gestion du sol

	NT-LSD	NT-HSD	Z-LSD	Z-NS	Z-HSD
pF3	11 (1)	11 (2)	13 (6)	15 (2)	11 (1)
pF4,2	5 (4)	5 (2)	6 (1)	8 (3)	5 (1)

Note : Les valeurs entre parenthèse représentent les écarts types

L'analyse du Tableau 2 montre que l'humidité à la capacité au champ va de 11% sous les modes de gestion du sol NT-LSD, NT-HSD et Z-HSD à 15% sous Z-NS contre respectivement une humidité au point de flétrissement permanent de 5 à 8%. Cependant, la variation des humidités caractéristiques sous tous les modes de gestion du sol a été identique. Les humidités plus élevées obtenues sous le mode de gestion du sol Z-NS pourraient être attribué à l'effet régressif du *P. reticulatum* sur le comportement hydrique des sols. L'analyse minutieuse de l'impact de la densité du *P. reticulatum* sur le comportement hydrique du sol a montré que les humidités caractéristiques pour la même densité de *P. reticulatum* restent identiques pour les pratiques culturales NT et Z mises en œuvre sous le mulch. Ce qui montre que la densité du *Piliostigma* n'a pas affecté significativement les propriétés hydriques du sol en deux ans. L'évolution comparative des humidités caractéristiques des différents modes de gestion du sol et de la situation de référence (traitement témoin) est représentée à la Figure 11.

L'analyse de la Figure 11 a montré que l'humidité à la capacité au champ a été plus élevée en 2014 qu'en 2012 faisant ressortir ainsi l'amélioration des propriétés hydriques du sol. La contribution la plus importante a été observée sous le mode de gestion Z-NS et confirme ainsi l'impact du Zaï sur les propriétés hydrique du sol. Sa contribution à l'amélioration des propriétés hydriques du sol a été de 5% à pF3 et 3% à pF4,2.

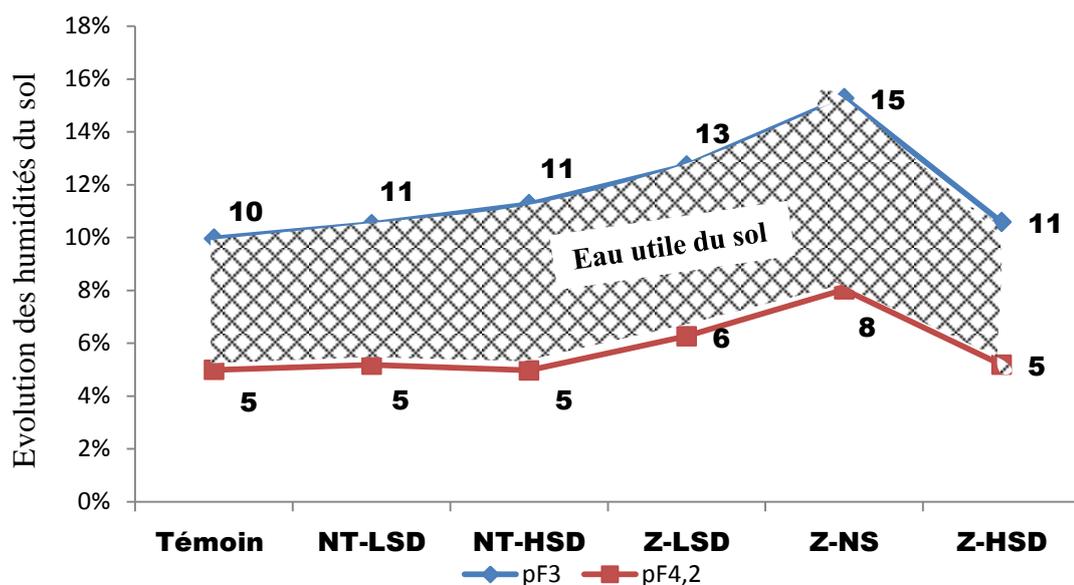


Figure 11 : Evolution temporelle (2012 à 2014) des humidités à la capacité au champ (pF3) et au point de flétrissement permanent (pF4,2) sur le site Crop-News

5.2. Evolution de la réserve utile des sols

5.2.1. Réserve utile sous le mode de gestion NT-NS

La distribution de la réserve utile suivant les profils est portée au Tableau 7 en Annexe 5. Cette distribution montre une réserve utile qui varie de 6 mm dans les 15 premiers centimètres du sol à 92 mm à 150 cm de profondeur. Pour synthétiser ces résultats vu que les profondeurs échantillonnées n'ont pas été uniformes sur tous les profils, un regroupement par type d'horizon a été effectué. Les horizons isolés se présentent comme suit :

- ✓ Horizon de surface qui va de 0 à 30 cm;
- ✓ Horizon médian allant de 30 à 60 cm;
- ✓ Horizon profond qui va de 60 à 120 cm.

Ainsi, le Tableau 3 présentant la synthèse de ces résultats montre que la réserve utile augmente avec la profondeur en passant de 26 mm dans l'horizon de surface à 85 mm pour l'horizon profond. Une variabilité croissante a été observée de l'horizon de surface vers l'horizon profond.

Tableau 3: Distribution de la réserve utile et de l'écart type suivant le type d'horizon en 2012

Horizon	Couche (cm)	RU (mm)	Ecart type (mm)
Superficiel	0-30	26	7
Médian	30-60	34	10
Profond	60-120	85	24

Cette comparaison sur les valeurs absolues de la réserve utile peut introduire des biais dans le sens de variation de la grandeur. Ainsi, ces valeurs absolues ont été mises en relation avec l'épaisseur de l'horizon. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 12. L'analyse montre une augmentation linéaire de la réserve utile unitaire avec la profondeur en passant de 87 mm/m de sol dans l'horizon de surface à 142 mm/m de sol dans l'horizon profond. L'horizon médian stocke une réserve utile de 113 mm/m de sol.

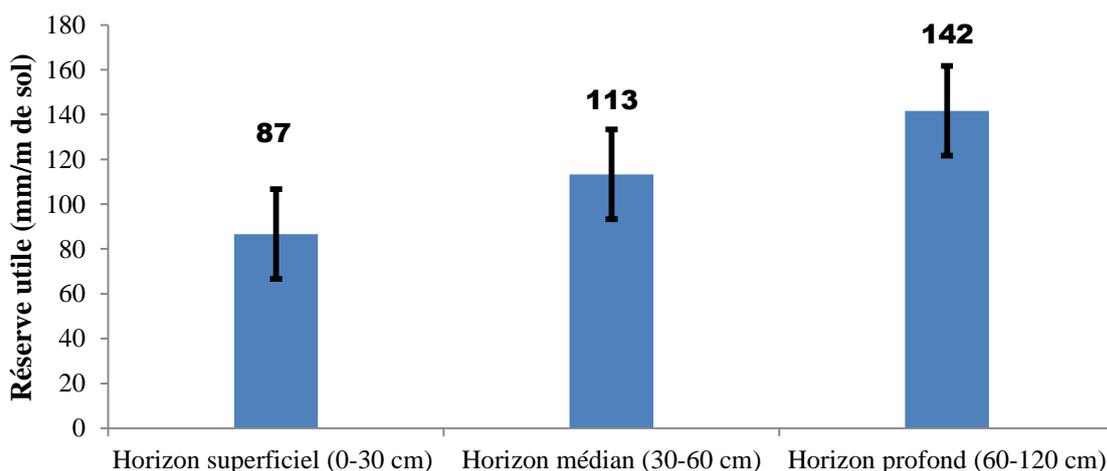


Figure 12: Evolution de la réserve utile (mm/m de sol) selon le type d'horizon

L'analyse statistique avec le test t de Student au seuil de 5% appliquée sur la distribution de la réserve utile selon les horizons a permis d'obtenir le Tableau 4.

Tableau 4: p-values du test t de Student à 5%

	Horizon de surface	Horizon médian	Horizon profond
Horizon de surface		0,148	0,055
Horizon médian	0,148		0,073
Horizon profond	0,055	0,073	

Le résultat du test montre que tous les p-values sont supérieures à 5%. Ce qui nous contraint à accepter l'hypothèse d'égalité de la distribution moyenne de la réserve utile selon la profondeur. Il en résulte donc statistiquement qu'aucune différence significative n'a été observée entre la réserve utile moyenne des différents horizons.

5.2.2. Réserve utile dans les parcelles sous un mode de gestion du sol en 2014

A travers les humidités caractéristiques déterminées sur les neuf parcelles échantillonnées en 2014, les réserves utiles obtenues par mètre de sol sont reportées sur la Figure 13. Les détails par mode de gestion et par bloc sont consignés dans le Tableau 8 en Annexe 5.

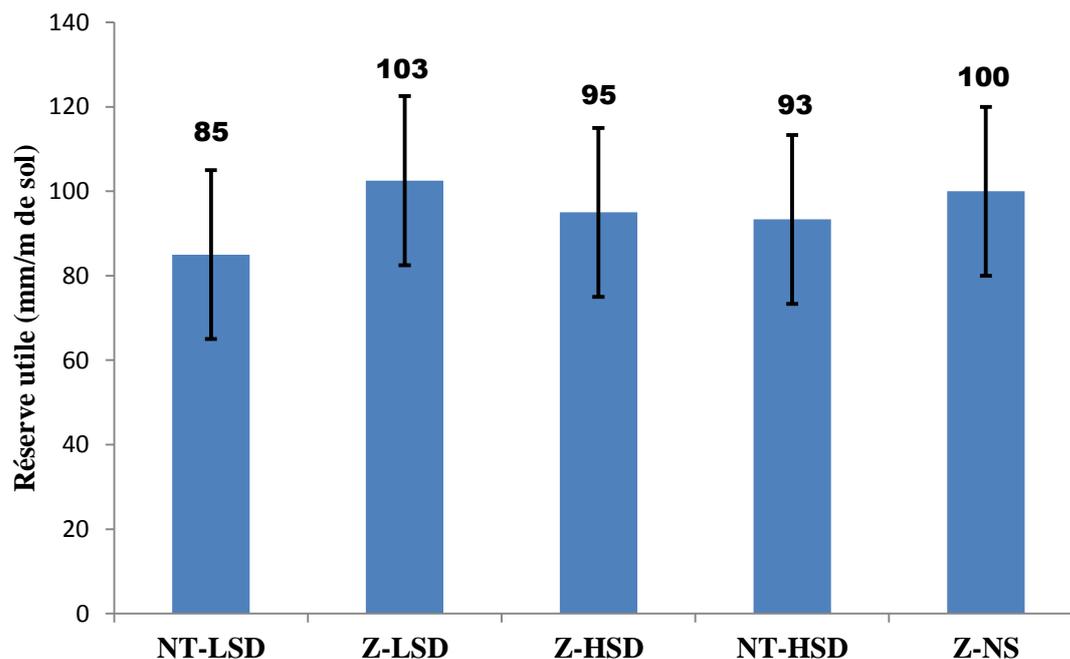


Figure 13: Réserve utile dans les différentes parcelles expérimentales en 2014

Cette Figure 13 montre que les parcelles sous le mode de gestion NT-LSD et NT-HSD ont une faible réserve utile (85 à 93 mm/m) par rapport aux autres menées sous le Zaï (95 à 103 mm/m). Etant donné que l'effet des arbustes sur l'amélioration des propriétés hydriques du sol n'a pas été significatif, l'augmentation de la réserve utile est alors attribuée à la pratique du Zaï. Car une comparaison de la distribution de la réserve utile sous la pratique culturale de Zaï et du mode de gestion NT-NS de la situation de référence montre une contribution du Zaï variant entre 8 et 16 mm par mètre de sol dans l'horizon superficiel. Ainsi, après deux ans de mise en place des techniques culturales, la contribution des modes de gestion du sol a varié de 6 à 16 mm/m de sol par rapport au témoin NT-NS. Ce qui montre une amélioration du stock d'eau sur le dispositif expérimental Crop-News et confirme par surcroît notre **hypothèse 1** selon laquelle le système de culture adopté et les pratiques culturales associées améliorent les propriétés hydriques du sol.

5.3. Contribution des graviers à la constitution de la réserve hydrique du sol

Dans cette partie, il a été question de voir si le gravier contribue à la rétention en eau du sol. Cette hypothèse vient du fait de la proportion importante des graviers dans les profils installés comme le montre la Figure 14.

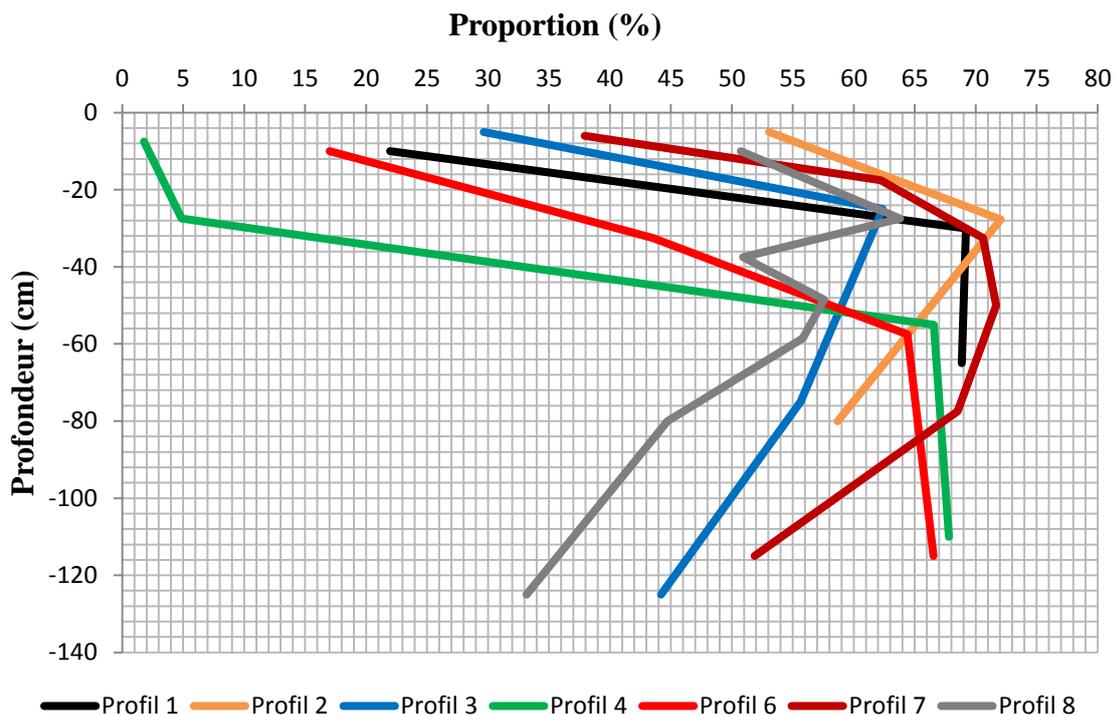


Figure 14 : Profil de distribution des graviers suivant la profondeur

L'analyse de la Figure 14 montre que la proportion de graviers varie de 2 à 72% dans les 40 premiers centimètres du sol et de 30 à 70% dans les 60 centimètres qui suivent. La proportion moyenne est de 37% dans les 60 premiers centimètres du sol et de 61% dans les horizons profonds. Cette distribution des graviers sur les différents profils est à l'origine de la distribution spatiale de la teneur en eau des graviers illustrée à la Figure 15.

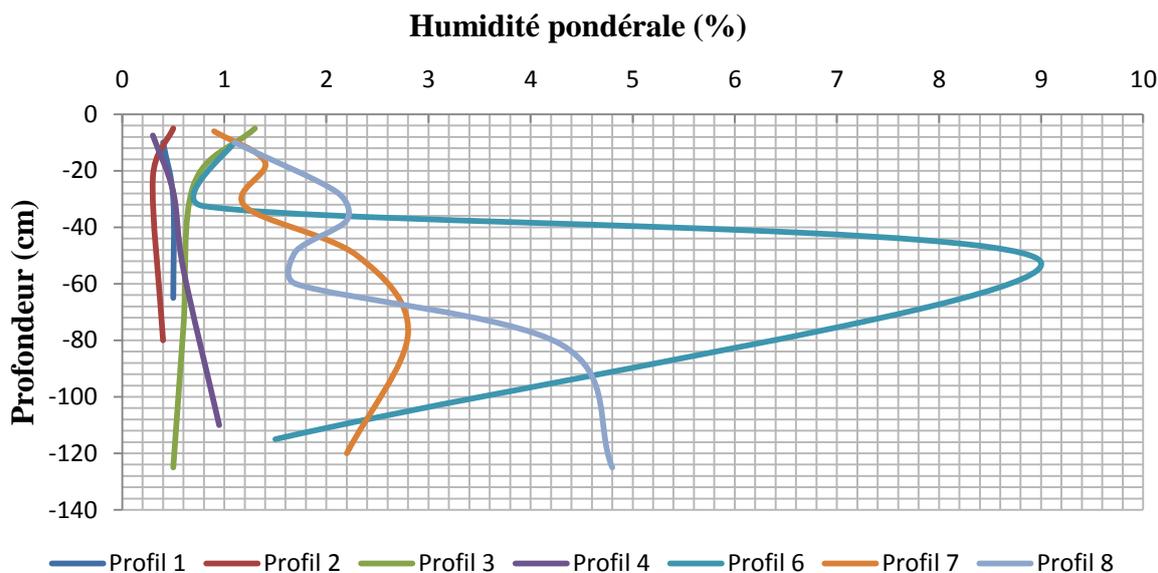


Figure 15 : Distribution spatiale de la teneur en eau des graviers suivant la profondeur

L'analyse de la Figure 15 montre des teneurs en eau plus faibles dans les horizons de surface que les horizons profonds à l'exception du profil 6 qui a montré un point d'inflexion à 50 cm de profondeur. Dans les 60 premiers centimètres, les teneurs en eau ont varié de 0,3 à 2,8% alors que dans les 60 centimètres suivants, les teneurs en eau des graviers ont varié de 0,6 à 4,8%.

Au total, ces teneurs en eau ont été faibles quel que soit le profil considéré et ne dépassent guère 9%. Rapportée à la masse totale du sol, la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol a varié en moyenne de 0,1 à 3,3% dans les 60 premiers centimètres et de 0,1 à 2,9% dans les 60 centimètres suivants. Ces contributions restent largement faibles par rapport aux contributions de la fraction fine du sol. Ce qui nous amène à accepter notre **hypothèse 2** selon laquelle les concrétions ferrugineuses présentent dans les sols du dispositif Crop-News contribuent peu à la constitution de la réserve en eau du sol. Ce résultat peut être expliqué par l'état d'altération des graviers qui présentent à leur surface peu de pores participant à l'écoulement de l'eau dans le sol.

5.4. Discussion des résultats

Cette étude qui a pour objectif d'étudier l'impact du mode de gestion du sol sur ses propriétés hydriques a montré que la pratique culturale du Zai ou du non labour combinés au paillage ont contribué à l'amélioration des humidités caractéristiques du sol. Ce résultat corrobore les travaux de Abdellaoui et al. (2011) qui suite à leurs études sur la conservation de l'eau du sol dans les 20 premiers centimètres sous trois modes de gestion du sol : le semis direct, le travail minimum et le travail conventionnel ont montré que le non labour améliore l'humidité du sol de près de 23%. De même, Nouiri et al. (2004), Bourguignon (2004) sont parvenus également au même résultat sur l'impact du non labour sur la conservation de l'eau du sol en zones semis arides. En effet, Abdellaoui et al. (2011) ont trouvé que le sol cultivé en semis direct garde plus d'humidité que le labour conventionnel surtout en présence de résidus et que les parcelles non labourées présentent une humidité qui augmente de 13% en surface jusqu'à 17% en profondeur. Quant à Nouiri et al. (2004), ils ont trouvé que le non labour valorise mieux les apports d'eau en préservant la quantité d'eau présente dans le sol avec un écart de 5% en sa faveur et Bourguignon (2004) trouve également que l'évolution de l'humidité du sol passe de 5,8% à 12,7% en labour et de 10,6% à 17,3% en semis direct. Ainsi, nous pouvons conclure que le non labour sous couvert végétal retient plus d'humidité dans le sol. Les travaux de Ma et al. (2013) ont montré aussi que les pratiques agricoles

concourant à la gestion durable du sol telles que le paillage ou mulch sont essentielles et significatives à l'atténuation de l'épuisement rapide des ressources en eau du sol.

Par ailleurs, les résultats obtenus en 2012 et en 2014 sur le dispositif Crop-News ont révélé une variation de la réserve utile d'une parcelle à une autre et une distribution non uniforme selon les horizons. Cette variation spatiale de la réserve utile corrobore les travaux de Dembele et Some (1991), Vereecken et al. (2014), Goulard et Voltz (1994) qui ont rapporté que la réserve utile diffère d'un type de sol à un autre. Sur la base de leurs résultats ces auteurs ont pu montrer que pour les sols sableux et limoneux la réserve utile varie respectivement de 25 à 100 mm/m et de 100 à 175 mm/m alors que pour les sols argileux, cette grandeur pointe vers 175 à 250 mm/m de sol.

La distribution croissante de la réserve utile avec la profondeur trouvée dans le cadre de notre étude a été déjà rapportée par Pallo et Thiombiano (1989), Dembele et Some (1991). Ces auteurs ont effectué leurs travaux dans les mêmes conditions pédo climatiques que notre étude et ont trouvé que l'horizon superficiel (0-50 cm) a une réserve utile de 100 mm/m tandis que l'horizon profond (50-100 cm) a une réserve utile de 140 mm/m. Nos résultats corroborent aussi ceux de Ben et al. (2002) qui après avoir obtenu sur les sols peu évolués de Béjà en Tunisie une réserve utile de 156 mm/m sur l'horizon superficiel (0-40 cm), 169 mm/m sur l'horizon médian (40-80 cm) et 174 mm/m sur l'horizon profond (80-120 cm), affirment que l'horizon de profondeur a une RU plus élevée que celui de surface. Néanmoins, sur les sols peu évolués de Le Kef (toujours en Tunisie), ces derniers auteurs ont trouvé une distribution décroissante de la réserve utile avec la profondeur. Selon eux, la réserve utile est plus élevée en surface qu'en profondeur sur ces sols de Le Kef soit 140 mm/m sur l'horizon superficiel (0-40 cm), 121 mm/m sur l'horizon médian (40-80 cm) et 97 mm/m sur l'horizon profond (80-120 cm). Les études menées par Schwen et al. (2014) ont montré également que la rétention d'eau est plus importante dans les parties supérieures des profils et considérablement plus faible dans les couches inférieures. Ces deux derniers résultats contraires ont été obtenus sous culture. Cette contraction émane donc du rôle que joue la matière organique dans la rétention d'eau par le sol rapporté par Huber et Schaub (2011).

Les techniques culturales mises en place sur le dispositif ont donné une réserve utile qui diffère d'un mode de gestion du sol à un autre. Toutefois, nos résultats ont montré sur l'ensemble des modes de gestion du sol adoptés sur le site que c'est la technique Z-NS seule qui contribue significativement à l'amélioration des propriétés hydriques du sol avec une

réserve utile de 100 mm/m de sol. Nous pouvons donc affirmer que la pratique culturale de Zaï associée au mulching contribue à l'amélioration du stock d'eau du sol. Cette conclusion corrobore les travaux de Ma et al. (2013) qui sur la base des études effectuées dans la plaine nord en Chine ont trouvé que le paillage ou le mulching, la jachère et l'amendement du sol sont essentiels et significatifs pour l'atténuation de l'épuisement rapide des ressources en eau du sol. D'autres auteurs comme Roose et al. (1999), Kaboré et Reij (2004), Lahmar et Yacouba (2012) ont rapporté également les effets bénéfiques de la pratique du Zaï sur l'amélioration des propriétés hydro-physiques du sol.

L'étude sur la contribution des graviers à la constitution de la réserve en eau du sol a montré que malgré la proportion relativement importante des graviers sur le profil des sols du dispositif Crop-News, leur contribution a été très faible et ne dépasse guère 3,3%. Le taux de gravillonnement de 2 à 72% trouvé dans le cadre de notre étude corrobore les travaux de Pallo et Thiombiano (1989) qui ont rapporté des taux allant jusqu'à 80%. Ces auteurs ont montré également que l'horizon de surface des sols ferrugineux concrétionnés du Burkina Faso présente une faible réserve utile due au taux de gravillonnement élevé. Au-delà de cet horizon, la réserve utile croît, favorisée par la texture limono-argilo-sableuse ou limono-argileuse des horizons inférieurs lorsqu'ils ne sont pas fortement concrétionnés. L'état d'altération de ces concrétions peut être à l'origine de cette faible contribution.

En définitive, nous pouvons affirmer que pour ces deux années de mise en place du dispositif, la densité des arbustes n'a pas encore d'effets notables sur le stock d'eau du sol et c'est seulement la pratique du Zaï et ou du semis direct combinée au mulch qui a contribué à l'amélioration de la réserve utile du sol. C'est donc le maintien d'un couvert végétal qui aide à retarder le dessèchement de la surface et à garder le sol plus humide. Ainsi, malgré l'importance des concrétions ferrugineuses dans le profil des sols du dispositif Crop-News, leur contribution à la constitution de la réserve en eau du sol est négligeable. L'importance de la contribution dépend des particules de sol de taille inférieure à 2 mm telles que le sable fin, les limons et l'argile.

VI. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude concerne l'évolution spatio-temporelle des humidités caractéristiques et de la réserve utile des sols du dispositif expérimental Crop-News de Kamboinsé. Elle s'est basée sur l'établissement des profils des humidités caractéristiques en vue de calculer la réserve utile. La démarche combinant les deux types de pratiques culturales (Zaï et semis direct manuel) avec les propriétés hydriques du sol et l'apport des graviers se sont effectuées à partir d'analyse des sols prélevés avant et après installation du dispositif. Deux hypothèses ont été formulées : l'une sur le système de culture adopté et les pratiques culturales associées par rapport aux propriétés hydriques des sols et l'autre sur la contribution des graviers à la constitution du stock d'eau dans ces sols. En effet, ces sols sont caractérisés par une importante proportion de fraction granulométrique grossière constituée essentiellement de graviers. Pour ce faire, deux protocoles ont été adoptés permettant l'analyse des échantillons de la terre après tamisage à 2 mm et celle du refus constitué essentiellement de graviers dans le but de déterminer les humidités caractéristiques du sol, la réserve utile de ces sols et la contribution des graviers à la constitution du stock d'eau du sol.

Les résultats obtenus après deux ans d'expérience ont montré que la réserve utile du sol s'est améliorée par rapport à celle du sol témoin (aucune pratique culturale mise en place). Ce qui a permis de corroborer la notion d'amélioration des propriétés hydriques par les pratiques culturales. Toutefois, il est à noter que ces sols ont un faible pouvoir de rétention en eau caractéristique des sols ferrugineux tropicaux lessivés très concrétionnés. Aussi, nos résultats pour le moment n'ont pas montré l'effet significatif des arbustes associés aux pratiques culturales durant sur ces deux premières années.

L'analyse des graviers a montré que cette fraction granulométrique grossière présente en forte proportion dans les sols a une humidité faible et contribue peu à la constitution du stock d'eau du sol. Ce résultat est dû certainement à leur faible degré d'altération.

Vu le fait que c'est seulement l'horizon superficiel des parcelles (0-20 cm) qui a été étudié pour la détermination de la réserve utile du sol, il serait intéressant de :

- Poursuivre cette étude en prenant aussi en compte les horizons plus profonds ;
- Evaluer la contribution des résidus organiques qu'auraient laissés les arbustes à la rétention de l'eau du sol.

VII. BIBLIOGRAPHIE

- Abdellaoui, Z., Teskrat, H., Belhadj, A. et Zaghouane, O. (2011), Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n.96 éd. In: Bourzerzour H. (ed), Irekti H. (ed), Vadon B. (ed): 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, p. 71-87 .
- Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O. et Cousin, L. (2007), Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols : Etude et gestion des sols, 17p.
- Kéïta, A. (2014), Assianissement des terres agricole, V.1.16. Ouagadougou: 2iE, IRH_Eau Agricole, pp 97-104.
- Barontini, S., Grottolo, M. et Pilotti, M. (2013), Inferring the Hydraulic Properties of a Historical Soil: A Revisiting of Perrault's Experiments. *Four Decades Prog. Monit. Model. Process. Soil-Plant-Atmosphere Syst. Appl. Chall.* 19, 590–598. doi:10.1016/j.proenv.2013.06.067.
- Ben, M. Salem, Ben, H.Hassine, G., Bonin, E. et Braudeau (2002), Réserve utile des sols du Nord-Ouest tunisien, évolution sous culture. Tunisie: Etude et Gestion des sols, volume10,1. 16p.
- Berisso, F.E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., de Jonge, L.W., Iversen, B.V., Arvidsson, J. et Forkman, J. (2012), Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil Tillage Res.* 122, 42–51. doi:10.1016/j.still.2012.02.005.
- Bouma, J. et Van Lanen, H. (1987), Transfer functions and threshold values. from soil characteristics to land qualities: 5p.
- Bourguignon, C. (2004), Comparaison analytique des sols tunisiens cultivés en labour et en semis direct. Tunisie: Dans : Actes deux deuxièmes rencontres méditerranéennes sur le semis direct, pp. 90-98.
- Braudeau, E. et Zidi, C. (1998), Le rétractomètre. Mode d'emploi et utilisation pour la caractérisation hydro-structurale des sol. ES 303: Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 25 pages.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R. et Jamagne, M. (1996), Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. Centre de Recherches d'Orléans Avenue de la Pomme de Pin.F45160 Ardon: Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Unité de science du sol-SESCPF. pp 27-40.
- Cournac, L., Felix, G., Hien, E., Lahmar, R., Douzet, J-M., Founoune-Mboup, H., Ndour, Y., Niang, D., Séguis, L., Gautier, D., Zongo, E., Manlay, R., Barthes, B., Clermont-Dauphin, C., Masse, D., Belem, M., Groot, J., Scholberg, J. et Tiftonell, P. (2015), Can woody plants management provide soil amendments to enhance agroecosystem productivity and resilience in West Africa. Ouagadougou: CIRAD, IRD, ISRA, 2iE, IESOL, CILSS.

- Dembele, Y. et Some, L. (1991), Propriétés hydrodynamiques des principaux types de sol du Burkina Faso. IAHS. non. 199, 1991 éd. Ouagadougou: INERA, 03 bo 7192, Ouagadougou 03, Burkina Faso.
- Duchaufour, P. (2004), Introduction à la science du sol. 6eme édition: Dunod.
- Gaume, E. (2002), Eléments d'analyse sur les crues "éclair". Thèse Doctorale: ENGREF.
- Goulard, M. et Voltz, M. (1994), Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma*: 62, pp109-123.
- Hölzel, H., Diekkrüger, B., Biemelt, D. et Gädeke, A. (2013), Impact of dumped sediment structures on hydrological modelling in the artificial Chicken Creek catchment, Germany. *J. Hydrol.* 477, 189–202. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.029.
- Huber, G. et Schaub, C. (2011), La fertilité des sols: l'importance de la matière organique. *Agricultures et Territoires, Chambre d'Agriculture Bas-Rhin*, 46p.
- INERA (2014), Institut d'Etudes et de Recherches Agricoles-Rapport d'activités. INERA-Kamboinsé éd. Ouagadougou-Burkina Faso: Ministère des Enseignements Secondaire, Supérieur et de la Recherche Scientifique.
- Kabore, D. et Reij, C. (2004), The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso. International Food Policy Research Institute, Washington.
- Lahmar, R., Tittonell, P., Scopel, E., Andrieu, N., Posthumus, H., Mapfumo, P., Corbeels, M., Van Halsema, G.E., Lugandu, S., Rakotoarisoa, J., Mtambanengwe, F., Pound, B., Chikowo, R., Naudin, K., Triomphe, B. et Mkomwa, S. (2011), Agroecology-based aggradation-conservation agriculture (ABACO) : Targeting innovations to combat soil degradation and food insecurity in semi-arid Africa. CIRAD: 7p.
- Lahmar, R. et Yacouba, H. (2012), Zaï et potentiel de l'association culture annuelles arbustes natifs. Ouagadougou: IRD.
- Ma, Y., Feng, S. et Song, X. (2013), A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain. *Agric. Water Manag.* 127, 13–24. doi:10.1016/j.agwat.2013.05.011.
- Morel, R. (1989), Les sols cultivés. Technique et Documentation. Lavoisier: 373 p.
- Nasta, P. et Gates, J.B. (2013), Plot-scale modeling of soil water dynamics and impacts of drought conditions beneath rainfed maize in Eastern Nebraska. *Agric. Water Manag.* 128, 120–130. doi:10.1016/j.agwat.2013.06.021.
- Nouiri, I., M'hedbi, K., Ben, Hammouda M., Neit, El Abri S., Ali, Hannachi M., Guesmi, L., Mannai, C. et Hajji, S. (2004), Etude comparative de l'humidité des horizons du sol entre le semis direct et le semis conventionnel. Dans: Actes des deuxièmes rencontres méditerranéennes sur le semis direct.
- ORSTOM-IRD (1993), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Etude du sol. Ouagadougou-Burkina Faso: Institut de Recherche pour le Développement.
- Pachepsky, Y., Timlin, D. et Rawls, W. (2003), Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Soil Hydrol. Prop. Process. Their Var. Space Time* 272, 3–13. doi:10.1016/S0022-1694(02)00251-2.

- Pallo, F. et Thiombiano, L. (1989), Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions du Burkina Faso : Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. Soltrop 89 éd. Ouagadougou: BUNASOLS-BP 7142-Ouagadougou-Burkina Faso; p 316.
- Pasquier, L. (2000), Guide du sol : Largile et Lamotte. ENESAD: Unité Informatique Pédagogique; 111p.
- Piedallu, C., Richard, J.-B., Gaudin, S. et Legay, M. (2012), Cartographie de la contrainte hydrique des sols forestiers : Exemple sur les plateaux calcaires du Nord-Est de la France. AgroParisTech: Engref Nancy; 6 p.
- Robinson, D.A., Abdu, H., Lebron, I. et Jones, S.B. (2012), Imaging of hill-slope soil moisture wetting patterns in a semi-arid oak savanna catchment using time-lapse electromagnetic induction. *J. Hydrol.* 416–417, 39–49. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.034.
- Romano, N. (2014), Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *Determ. Soil Moisture Meas. Theor. Approaches* 516, 6–20. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.026.
- Roose, E., Kabore, V. et Guenat, C. (1999), Le Zaï : Fonctionnement, limite et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en régions soudano-sahélienne. N°83, 1999-2 éd. Ouagadougou-Burkina Faso: Echos du Cota.
- Slama, F. (1989), La culture du blé. Quelques aspects agronomiques et physiologiques.. Tunisie: Bulletin 'Sols de Tunisie', n°13, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, pp 125-131.
- Trouche, G. et Morlan, P. (1997), Comparaison des différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (RU) dans le périmètre de l'O.GAF, environnement de la zone de Migennes (Yonne). *Etude et Gestion des sols*: 13p.
- Schwen, A., Zimmermann, M. et Bodner, G. (2014), Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations. *Determ. Soil Moisture Meas. Theor. Approaches* 516, 169–181. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.042.
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Pachepsky, Y., Montzka, C., van der Kruk, J., Bogen, H., Weiermüller, L., Herbst, M., Martinez, G. et Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Determ. Soil Moisture Meas. Theor. Approaches* 516, 76–96. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.061.

Sites internet

[-u-picardie.fr ,http://www.google.bf/imgres?imgurl=https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol_fichiers/du6-6.gif&imgrefurl=https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm&h=221&w=320&tbnid=1RM9lpbFpwLYQM:&zoom=1&docid=nrxjDshcwCmFM&ei=75NQVb2fF8uwUZWHgMgD&tbnid=isch&ved=0CB8QMygAMAA](http://www.google.bf/imgres?imgurl=https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol_fichiers/du6-6.gif&imgrefurl=https://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/eau-sol.htm&h=221&w=320&tbnid=1RM9lpbFpwLYQM:&zoom=1&docid=nrxjDshcwCmFM&ei=75NQVb2fF8uwUZWHgMgD&tbnid=isch&ved=0CB8QMygAMAA) ; Consulté le 18/05/2015-IRD ;

<http://image.slidesharecdn.com/programmedemcaniquedessols-140314190627-phpapp01/95/programmede-mcanique-des-sols-16-638.jpg?cb=1394824159> ; ou encore <http://fr.slideshare.net/fatehfateh/programmede-mcanique-des-sols>; Consulté le 18/05/2015-IRD.

VIII. ANNEXES

Annexe 1 : Photos des échantillons de la terre fine des parcelles expérimentales et profilsI
Annexe 2: Protocole expérimental II
Annexe 3 : Reste de matériel utilisé pour l'analyse d'échantillonsIV
Annexe 4 : Evolution temporelle des humidités caractéristiques sur le site Crop-News..... V
Annexe 5 : Evolution temporelle de la réserve utile sur le site Crop-News VI
Annexe 6 : Résultats complets sur les graviers _ Profil 1 à Profil 8VII

Annexe 1 : Photos des échantillons de la terre fine des parcelles expérimentales et profils



Annexe 2: Protocole expérimental

❖ Préparation des échantillons

Pour la préparation des échantillons à utiliser, le protocole recommande de :

- Mettre les plaques à tremper dans de l'eau déminéralisée 24 heures avant la mise en place des échantillons ;
- Poser les plaques (imprégnées d'eau) dans un bac en plastique ou émaillé, disposer les anneaux numérotés sur chaque plaque ;
- Échantillonner en transvasant dans un plateau émaillé tout le sol (tamisé à 2 mm) contenu dans la boîte ;
- Mélanger avec une spatule de façon à homogénéiser le sol puis prélever avec la spatule, par petites fractions, en différents endroits du plateau ;
- Recueillir les fractions prélevées dans une main de nickel puis verser l'échantillon au centre de l'anneau, répartir et raser (sans tasser) ;
- Mettre un échantillon témoin sur chaque plaque ;
- Verser lentement de l'eau déminéralisée dans le bac pour imbiber les échantillons. L'eau doit recouvrir la plaque de céramique ;
- Laisser en contact avec l'eau pendant 24 heures ;
- S'assurer que la plaque reste toujours submergée, ajouter un peu d'eau si nécessaire.

❖ Mise sous pression

Le protocole recommande de :

- Siphonner l'eau du bac puis incliner la plaque pour évacuer l'excédent d'eau en évitant de faire glisser les anneaux contenant les échantillons ;
- Placer les plaques dans l'extracteur ;
- Mettre en place les tubulures d'évacuation d'eau ;
- Placer le joint torique et le couvercle ; fixer ce dernier en serrant les écrous à la main ;
- Raccorder les tubes aux tubulures d'évacuation et recueillir l'eau dans un bécher ;
- Mettre sous pression ;
- Vérifier que le manomètre de la bouteille est dévissé et ouvrir la bouteille ;
- A l'aide du manomètre de réglage, monter progressivement la pression pour permettre l'évacuation de l'eau et des bulles d'air (pour le pF 4.2, monter très lentement la pression jusqu'à 15 bars). Plusieurs heures sont nécessaires pour atteindre l'équilibre ;
- Vérifier fréquemment la pression ;

- Surveiller les sorties d'eau. L'échappement régulier de bulles d'air est l'indice d'une fuite provenant d'une plaque défectueuse ou d'un mauvais raccordement ;
- 24 heures après la mise sous pression, raccorder les burettes aux tubulures d'évacuation et noter, matin et soir, la hauteur d'eau dans chaque burette. Les niveaux ne varient plus lorsque l'équilibre entre la force de rétention de l'eau par le sol et la pression exercée est atteint. Néanmoins, pour s'assurer de la fiabilité des mesures, les échantillons sont maintenus sous pression pendant 3 jours.

❖ **Déchargement des échantillons**

Le protocole recommande de :

- Fermer la bouteille ou robinet d'alimentation en air comprimé, dévisser le manomètre ;
- Évacuer lentement l'air comprimé ;
- Quand le manomètre indique 0, ouvrir l'extracteur et sortir les plaques avec précaution, sans déplacer les anneaux ;
- Transvaser rapidement le sol contenu dans les anneaux (au moyen d'une spatule métallique que l'on glisse sous l'anneau) dans une boîte à tare pesée à ± 1 mg ;
- Fermer immédiatement la boîte à tare ;
- Travailler avec des mains sèches et s'assurer que les boîtes n'ont pas été souillées par du sol ou de l'eau, les essuyer avec un papier filtre si nécessaire ;
- Peser sans délai les boîtes à tare puis les ouvrir et les placer dans une étuve à 105 °C ;
- Laisser sécher pendant 48 heures ;
- Refermer les boîtes à tare, les laisser refroidir dans un dessiccateur et les peser de nouveau.

Annexe 3 : Reste de matériel utilisé pour l'analyse d'échantillons



Annexe 4 : Evolution temporelle des humidités caractéristiques sur le site Crop-News

Tableau 5 : Résultats des humidités caractéristiques en situation de référence

Profil 1				Profil 2			
Horizons	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-20	8	4	1	0-10	12	5
2	20-40	15	6	2	10 à 35	15	9
3	40-80	21	13	3	60-100	22	14

Profil 3				Profil 4			
Horizons	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-10	9	5	1	0-15	8	3
2	10 à 40	23	14	2	20-35	13	6
3	50-100	25	15	3	50-60	27	16
4	100-150	23	14	4	100-120	25	15

Profil 6				Profil 7			
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-15	14	7	1	0-12	8	4
2	25-40	22	14	2	12 à 22	11	6
3	45-60	26	15	3	25-40	15	10
4	100-130	20	11	4	40-60	23	15
				5	60-95	23	15
				6	110-130	24	15

Profil 8			
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-20	12	6
2	20-35	22	14
3	35-40	19	12
4	40-57	26	16
5	57-63	21	12
6	63-100	25	16
7	100-150	28	18

Tableau 6 : Résultats des humidités caractéristiques en fonction des pratiques culturales

Parcelles expérimentales du bloc 1

Paramètres		NT-LSD		Z-LSD		NT-HSD	
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-10	10	5	13	6	11	6
2	10 à 20	12	6	13	6	14	7

Parcelles expérimentales du bloc 2

Paramètres		NT-LSD		Z-LSD	
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-10	10	4	14	7
2	10 à 20	11	5	10	6

Parcelles expérimentales du bloc 3

Paramètres		Z-HSD		Z-LSD	
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-10	10	4	12	6
2	10 à 20	10	5	12	6

Parcelles expérimentales du bloc 4

Paramètres		NT-HSD		Z-NS	
Horizon	Couche (cm)	pF3 (%)	pF4,2 (%)	pF3 (%)	pF4,2 (%)
1	0-10	7	3	14	6
2	10 à 20	11	2	17	10

Annexe 5 : Evolution temporelle de la réserve utile sur le site Crop-News

Tableau 7 : Résultats de la réserve utile sur le témoin NT-NS

Profil 1		Profil 2	
Horizons	RU moyen (mm)	Horizons	RU moyen (mm)
1 (0 à 20 cm)	13	1 (0 à 10 cm)	12
2 (20 à 40 cm)	26	2 (10 à 35 cm)	23
3 (40 à 80 cm)	47	3 (60 à 100 cm)	40
Profil 3		Profil 4	
Horizons	RU moyen (mm)	Horizons	RU moyen (mm)
1 (0 à 10 cm)	6	1 (0 à 15 cm)	12
2 (10 à 40 cm)	33	2 (20 à 35 cm)	16
3 (50 à 100cm)	78	3 (50 à 60 cm)	15
4 (100 à 150 cm)	73	4 (100 à 120 cm)	32
Profil 6		Profil 7	
Horizons	RU moyen (mm)	Horizons	RU moyen (mm)
1 (0 à 15 cm)	15	1 (0 à 12 cm)	6
2 (25 à 40 cm)	17	2 (12 à 22 cm)	8
3 (45 à 60 cm)	27	3 (25 à 40 cm)	12
4 (100 à 130 cm)	42	4 (40 à 60 cm)	27
		5 (60 à 95 cm)	45
		6 (110 à 130 cm)	24
Profil 8			
Horizons	RU moyen (mm)		
1 (0 à 20 cm)	25		
2 (20 à 35 cm)	21		
3 (35 à 40 cm)	6		
4 (40 à 57 cm)	30		
5 (57 à 63 cm)	10		
6 (63 à 100 cm)	62		
7 (100 à 150 cm)	92		

Tableau 8 : Réserve utile dans les différentes parcelles expérimentales

Parcelles	RU moyen (mm)	RU moyen (mm/m)
Bloc 1 : NT-LSD	17	85
Bloc 1 : Z-LSD	23	115
Bloc 1 : NT-HSD	18	90
Bloc 2 : NT-LSD	17	85
Bloc 2 : Z-LSD	18	90
Bloc 3 : Z-HSD	19	95
Bloc 3 : NT-HSD	21	105
Bloc 4 : NT-HSD	17	85
Bloc 4 : Z-NS	20	100

Annexe 6 : Résultats complets sur les graviers _ Profil 1 à Profil 8

Profil 1 :

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+graviers V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 20 cm	R1	250	100,176	287	37	2,70745946	100,768	0,592	0,006	0,016
	R2	250	100,337	287	37	2,71181081	100,546	0,209	0,002	0,006
	R3	250	100,544	288	38	2,64589474	101,015	0,471	0,005	0,012
	Moyenne	250	100,35233	287,3333333	37,33333333	2,68838834	100,7763333	0,424	0,004	0,011
	ET	0	0,1844785	0,577350269	0,577350269	0,03686479	0,234611026	0,195777935	0,002	0,005
20 à 40 cm	R1	250	100,401	288	38	2,64213158	100,959	0,558	0,006	0,015
	R2	250	100,595	290	40	2,514875	101,045	0,45	0,004	0,011
	R3	250	100,762	290	40	2,51905	101,218	0,456	0,005	0,011
	Moyenne	250	100,586	289,3333333	39,33333333	2,55868553	101,074	0,488	0,005	0,012
	ET	0	0,1806682	1,154700538	1,154700538	0,07229655	0,13191285	0,060695964	0,001	0,002
50 à 80 cm	R1	250	100,118	290	40	2,50295	100,601	0,483	0,005	0,012
	R2	250	100,788	290	40	2,5197	101,271	0,483	0,005	0,012
	R3	250	100,328	292	42	2,3887619	100,813	0,485	0,005	0,012
	Moyenne	250	100,41133	290,6666667	40,66666667	2,47047063	100,895	0,483666667	0,005	0,012
	ET	0	0,3426855	1,154700538	1,154700538	0,07125572	0,342444156	0,001154701	0,000	0,000

Profil 2

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+graviers V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 10 cm	R1	250	100,167	290	40	2,504175	100,612	0,445	0,004	0,011
	R2	250	100,055	289	39	2,56551282	100,623	0,568	0,006	0,015
	R3	250	100,564	292	42	2,39438095	101,015	0,451	0,004	0,011
	Moyenne	250	100,262	290,3333333	40,33333333	2,48802292	100,75	0,488	0,005	0,012
	ET	0	0,26746776	1,527525232	1,527525232	0,08670177	0,229562628	0,069346954	0,001	0,002
10 à 35 cm	R1	250	100,624	294	44	2,28690909	100,973	0,349	0,003	0,008
	R2	250	100,831	290	40	2,520775	101,2013	0,3703	0,004	0,009
	R3	250	100,242	289	39	2,57030769	100,536	0,294	0,003	0,008
	Moyenne	250	100,565667	291	41	2,45933059	100,9034333	0,337766667	0,003	0,008
	ET	0	0,29880149	2,645751311	2,645751311	0,15136133	0,338061627	0,039370844	0,000	0,001
60 à 100 cm	R1	250	100,572	293	43	2,33888372	100,834	0,262	0,003	0,006
	R2	250	100,461	294	44	2,28320455	100,962	0,501	0,005	0,011
	R3	250	100,439	292	42	2,39140476	100,976	0,537	0,005	0,013
	Moyenne	250	100,490667	293	43	2,33783101	100,924	0,433333333	0,004	0,010
	ET	0	0,07129049	1	1	0,05410779	0,07825599	0,14946683	0,001	0,004

Profil 3

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+gravier V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 10 cm	R1	250	100,288	286	36	2,785777778	101,917	1,629	0,016	0,045
	R2	250	100,525	286	36	2,792361111	102,022	1,497	0,015	0,042
	R3	250	100,527	290	40	2,513175	101,259	0,732	0,007	0,018
	Moyenne	250	100,44667	287,3333333	37,33333333	2,69710463	101,7326667	1,286	0,013	0,035
	ET	0	0,137413	2,309401077	2,309401077	0,159321739	0,413553302	0,484296397	0,005	0,015
10 à 40 cm	R1	250	100,722	290	40	2,51805	101,531	0,809	0,008	0,020
	R2	250	100,452	289	39	2,575692308	100,943	0,491	0,005	0,013
	R3	250	100,703	287	37	2,721702703	101,446	0,743	0,007	0,020
	Moyenne	250	100,62567	288,6666667	38,66666667	2,605148337	101,3066667	0,681	0,007	0,018
	ET	0	0,1506995	1,527525232	1,527525232	0,104973087	0,317799203	0,167821334	0,002	0,004
50 à 100 cm	R1	250	100,068	289	39	2,565846154	100,576	0,508	0,005	0,013
	R2	250	100,239	288	38	2,637868421	100,788	0,549	0,005	0,014
	R3	250	100,518	288	38	2,645210526	101,224	0,706	0,007	0,019
	Moyenne	250	100,275	288,3333333	38,33333333	2,616308367	100,8626667	0,587666667	0,006	0,015
	ET	0	0,2271497	0,577350269	0,577350269	0,043855477	0,330389669	0,104509968	0,001	0,003
100 à 150 cm	R1	250	100,616	289	39	2,579897436	101,12	0,504	0,005	0,013
	R2	250	100,688	289	39	2,58174359	101,089	0,401	0,004	0,010
	R3	250	100,466	287	37	2,715297297	100,981	0,515	0,005	0,014
	Moyenne	250	100,59	288,3333333	38,33333333	2,625646108	101,0633333	0,473333333	0,005	0,012
	ET	0	0,1132608	1,154700538	1,154700538	0,077645695	0,07296803	0,06288349	0,001	0,002

Profil 4

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+graviers V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 15 cm	R1	250	100,571	290	40	2,514275	100,892	0,321	0,003	0,01
	Moyenne	250	59,5825	275			59,852			
	ET	0	57,966493	21,21320344			58,0393246			
20 à 35 cm	R1	250	100,669	291	41	2,455341463	100,835	0,166	0,002	0,00
	R2	250	100,889	290	40	2,522225	101,364	0,475	0,005	0,01
	R3	250	100,415	290	40	2,510375	101,216	0,801	0,008	0,02
	Moyenne	250	100,65767	290,3333333	40,33333333	2,495980488	101,1383333	0,480666667	0,005	0,01
	ET	0	0,2372031	0,577350269	0,577350269	0,035689681	0,272918181	0,317537924	0,003	0,01
50 à 60 cm	R1	250	100,771	286	36	2,799194444	101,463	0,692	0,007	0,02
	R2	250	100,784	288	38	2,652210526	101,486	0,702	0,007	0,02
	R3	250	100,156	288	38	2,635684211	100,701	0,545	0,005	0,01
	Moyenne	250	100,57033	287,3333333	37,33333333	2,695696394	101,2166667	0,646333333	0,006	0,02
	ET	0	0,3588821	1,154700538	1,154700538	0,090012025	0,446728478	0,087899564	0,001	0,00
100 à 120 cm	R1	250	100,145	289	39	2,567820513	100,95	0,805	0,008	0,02
	R2	250	100,453	287	37	2,714945946	101,664	1,211	0,012	0,03
	R3	250	100,815	288	38	2,653026316	101,672	0,857	0,009	0,02
	Moyenne	250	100,471	288	38	2,645264258	101,4286667	0,957666667	0,010	0,03
	ET	0	0,3353625	1	1	0,073869212	0,414556791	0,220928344	0,002	0,01

Profil 6

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+gravier V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
5 à 15 cm	R1	250	100,462	289	39	2,575948718	101,811	1,349	0,013	0,03
	R2	250	100,649	287	37	2,720243243	101,976	1,327	0,013	0,04
	R3	250	100,641	289	39	2,580538462	101,282	0,641	0,006	0,02
	Moyenne	250	100,584	288,3333333	38,33333333	2,625576808	101,6896667	1,105666667	0,011	0,03
	ET	0	0,1057308	1,154700538	1,154700538	0,082015651	0,362560799	0,402563453	0,004	0,01
25 à 40 cm	R1	250	100,267	289	39	2,570948718	100,778	0,511	0,005	0,01
	R2	250	100,492	288	38	2,644526316	101,468	0,976	0,010	0,03
	R3	250	100,156	289	39	2,568102564	101,088	0,932	0,009	0,02
	Moyenne	250	100,305	288,6666667	38,66666667	2,594525866	101,1113333	0,806333333	0,008	0,02
	ET	0	0,1711929	0,577350269	0,577350269	0,043325038	0,345591281	0,256710602	0,003	0,01
45 à 60 cm	R1	250	100,658	288	38	2,648894737	101,459	0,801	0,008	0,02
	R2	250	100,552	288	38	2,646105263	101,175	0,623	0,006	0,02
	R3	250	100,548	289	39	2,578153846	101,801	1,253	0,012	0,03
	Moyenne	250	100,586	288,3333333	38,33333333	2,624384615	101,4783333	0,892333333	0,009	0,02
	ET	0	0,0623859	0,577350269	0,577350269	0,040061307	0,313447497	0,324778899	0,003	0,01
100 à 130 cm	R1	250	100,742	290	40	2,51855	103,656	2,914	0,029	0,07
	R2	250	100,092	291	41	2,441268293	102,588	2,496	0,025	0,06
	R3	250	100,111	290	40	2,502775	100,149	0,038	0,000	0,00
	Moyenne	250	100,315	290,3333333	40,33333333	2,487531098	102,131	1,816	0,018	0,04
	ET	0	0,3699149	0,577350269	0,577350269	0,040833785	1,797609246	1,553912481	0,015	0,04

Profil 7

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+gravier V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 12 cm	R1	250	100,469	288	38	2,643921053	100,919	0,45	0,004	0,01
	R2	250	100,017	288	38	2,632026316	101,165	1,148	0,011	0,03
	R3	250	100,677	285	35	2,876485714	101,728	1,051	0,010	0,03
	Moyenne	250	100,38767	287	37	2,717477694	101,2706667	0,883	0,009	0,02
	ET	0	0,3374335	1,732050808	1,732050808	0,137833356	0,414721995	0,378112417	0,004	0,01
12 à 22 cm	R1	250	100,549	289	39	2,578179487	102,084	1,535	0,015	0,04
	R2	250	100,696	289	39	2,581948718	102,16	1,464	0,015	0,04
	R3	250	100,799	286	36	2,799972222	101,89	1,091	0,011	0,03
	Moyenne	250	100,68133	288	38	2,653366809	102,0446667	1,363333333	0,014	0,04
	ET	0	0,1256437	1,732050808	1,732050808	0,126977999	0,139231223	0,238504368	0,002	0,00
25 à 40 cm	R1	250	100,405	287	37	2,713648649	101,783	1,378	0,014	0,04
	R2	250	100,376	287	37	2,712864865	101,794	1,418	0,014	0,04
	R3	250	100,408	288	38	2,642315789	101,207	0,799	0,008	0,02
	Moyenne	250	100,39633	287,3333333	37,33333333	2,689609768	101,5946667	1,198333333	0,012	0,03
	ET	0	0,017673	0,577350269	0,577350269	0,040959661	0,33577423	0,346410643	0,003	0,01
40 à 60 cm	R1	250	100,594	290	40	2,51485	102,455	1,861	0,019	0,05
	R2	250	100,334	290	40	2,50835	101,317	0,983	0,010	0,02
	R3	250	100,537	290	40	2,513425	104,594	4,057	0,040	0,10
	Moyenne	250	100,48833	290	40	2,512208333	102,7886667	2,300333333	0,023	0,06
	ET	0	0,1366614	0	0	0,003416535	1,663785543	1,583391718	0,016	0,04
60 à 95 cm	R1	250	100,144	289	39	2,567794872	102,058	1,914	0,019	0,05
	R2	250	100,16	290	40	2,504	103,863	3,703	0,037	0,09
	R3	250	100,225	290	40	2,505625	102,934	2,709	0,027	0,07
	Moyenne	250	100,17633	289,6666667	39,66666667	2,525806624	102,9516667	2,775333333	0,028	0,07
	ET	0	0,0428991	0,577350269	0,577350269	0,036371966	0,902629677	0,896342754	0,009	0,02
110 à 130 cm	R1	250	100,498	290	40	2,51245	103,071	2,573	0,026	0,06
	R2	250	100,686	289	39	2,581692308	103,132	2,446	0,024	0,06
	R3	250	100,808	290	40	2,5202	102,375	1,567	0,016	0,04
	Moyenne	250	100,664	289,6666667	39,66666667	2,538114103	102,8593333	2,195333333	0,022	0,06
	ET	0	0,1561666	0,577350269	0,577350269	0,037938247	0,420552414	0,547845173	0,005	0,01

Profil 8

Echantillon	Répétition	Volume d'eau V1 (ml)	Poids sec, P1 (g)	Volume eau+gravier V2 (ml)	Volume des graviers (V2-V1) (ml)	Densité des graviers (P1/(V2-V1))	Poids des graviers humides P2 (g)	Poids de l'eau adsorbée par les graviers (P2-P1) (g)	Gramme d'eau/gramme de gravier sec	Volume d'eau absorbé par le gravier/Volume de gravier sec
0 à 20 cm	R1	250	100,287	289	39	2,571461538	101,368	1,081	0,011	0,03
	R2	250	100,446	290	40	2,51115	101,597	1,151	0,011	0,03
	R3	250	100,36	288	38	2,641052632	101,379	1,019	0,010	0,03
	Moyenne	250	100,3643	289	39	2,574554723	101,448	1,083666667	0,011	0,03
	ET	0	0,079589	1	1	0,065006532	0,129154946	0,066040392	0,001	0,00
20 à 35 cm	R1	250	100,472	289	39	2,576205128	101,465	0,993	0,010	0,03
	R2	250	100,135	289	39	2,567564103	103,116	2,981	0,030	0,08
	R3	250	100,279	290	40	2,506975	102,524	2,245	0,022	0,06
	Moyenne	250	100,2953	289,3333333	39,33333333	2,550248077	102,3683333	2,073	0,021	0,05
	ET	0	0,169093	0,577350269	0,577350269	0,037723815	0,836435493	1,005099	0,010	1,74
35 à 40 cm	R1	250	100,456	290	40	2,5114	102,245	1,789	0,018	0,04
	R2	250	100,502	290	40	2,51255	102,038	1,536	0,015	0,04
	R3	250	100,444	289	39	2,575487179	103,767	3,323	0,033	0,09
	Moyenne	250	100,4673	289,6666667	39,66666667	2,533145726	102,6833333	2,216	0,022	0,06
	ET	0	0,030616	0,577350269	0,577350269	0,036673282	0,94417283	0,967	0,010	1,67
40 à 57 cm	R1	250	100,237	288	38	2,637815789	103,177	2,94	0,029	0,08
	R2	250	100,393	288	38	2,641921053	101,766	1,373	0,014	0,04
	R3	250	100,348	289	39	2,573025641	101,226	0,878	0,009	0,02
	Moyenne	250	100,326	288,3333333	38,33333333	2,617587494	102,0563333	1,730333333	0,017	0,05
	ET	0	0,080293	0,577350269	0,577350269	0,038646247	1,007382913	1,076441514	0,011	1,86
57 à 63 cm	R1	250	100,088	290	40	2,5022	102,312	2,224	0,022	0,06
	R2	250	100,161	292	42	2,384785714	101,783	1,622	0,016	0,04
	R3	250	100,454	289	39	2,57574359	101,711	1,257	0,013	0,03
	Moyenne	250	100,2343	290,3333333	40,33333333	2,487576435	101,9353333	1,701	0,017	0,04
	ET	0	0,193707	1,527525232	1,527525232	0,096315181	0,328183384	0,488316496	0,005	0,32
63 à 100 cm	R1	250	100,311	295	45	2,229133333	105,189	4,878	0,049	0,11
	R2	250	100,281	293	43	2,332116279	104,925	4,644	0,046	0,11
	R3	250	100,259	295	45	2,227977778	103,591	3,332	0,033	0,07
	Moyenne	250	100,2837	294,3333333	44,33333333	2,263075797	104,5683333	4,284666667	0,043	0,10
	ET	0	0,026102	1,154700538	1,154700538	0,059793603	0,856626718	0,833288265	0,008	0,72
100 à 150 cm	R1	250	100,411	295	45	2,231355556	103,383	2,972	0,030	0,07
	R2	250	100,371	293	43	2,334209302	106,187	5,816	0,058	0,14
	R3	250	100,325	293	43	2,333139535	105,849	5,524	0,055	0,13
	Moyenne	250	100,369	293,6666667	43,66666667	2,299568131	105,1396667	4,770666667	0,048	0,11
	ET	0	0,043035	1,154700538	1,154700538	0,059076245	1,530676103	1,564518243	0,016	1,35