



**ETUDE DES TRANSFERTS D'EAU SOUS LES  
TECHNIQUES DE REHABILITATION DES SOLS  
DEGRADEES AU SAHEL BURKINABE: CAS DU ZAÏ**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT  
OPTION : EAUX AGRICOLES**

-----  
Présenté et soutenu publiquement par

**Ruth Achta TODJIBE**

Le 16 juillet 2015

**Travaux dirigés par : Dr. Dial NIANG**, Enseignant-Chercheur

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

**M. Chaim DOTO**, Doctorant

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Angelbert BIAOU

Examineurs : Adjadi MOUNIROU

Arnaud Louis OUEDRAOGO

Vivien Chaim DOTO

**Promotion [2014/2015]**

## **REMERCIEMENTS**

Ce rapport n'est pas seulement l'aboutissement de trois mois de travail mais, celui de toutes ces années passées sur le banc de l'école. Ces quelques lignes ne pourront donc jamais me permettre de remercier tous ceux qui, de façon directe ou indirecte, y ont apporté leur contribution et ce, quelle que soit la nature de cela. Qu'ils retrouvent ici toute l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à :

- A toi Dieu Tout Puissant, de qui j'ai reçu grâce, bonté et bénédiction.
- Mon père TODJIBE NGABA et à ma mère DENON TAAM pour leurs investissements au cours de ma vie et particulièrement à mes études ; ceux qui ont tout donné pour mon instruction et mon éducation et sans l'aide de qui je n'ose imaginer ce que je serais devenu.
- Mes encadreurs, Dr. Dial NIANG, Enseignant-Chercheur (LEAH) du 2iE M. Chaïm DOTO, Doctorant (LEAH) du 2iE qui m'ont formé et accompagné tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de patience et de pédagogie ;
- Mon grand frère N'doryam Emmanuel qui m'a indiqué le chemin et qui ne cesse de m'encourager durant mon cursus universitaire ;
- Mes sœurs et mes petits, sans oublier ma sœur jumelle Djougoyan Mbang qui m'ont porté tout leur soutien;
- Toute la communauté tchadienne et mes amis du Burkina pour avoir contribué à mon intégration et le soutien apporté en particulier mon cousin Konon Serge et ma Tena Stella

Enfin tous ceux qui m'ont aidé durant mes études; je prie le Ciel afin qu'Il puisse vous accorder sa bénédiction.

## **TABLE DES MATIERES**

REMERCIEMENTS .....	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
LISTE DES FIGURES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT .....	vi
INTRODUCTION.....	1
I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....	5
1.1. Techniques de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso .....	5
1.1.1. Description du zaï.....	6
1.1.2. Description des demi-lunes .....	7
1.1.3. Description des cordons pierreux .....	7
1.2. Méthodes de mesure de l'humidité du sol.....	8
1.2.1. Méthode gravimétrique: .....	9
1.2.2. Méthode par sonde à neutrons .....	10
1.2.3. Méthode par mesure de la conductivité électrique.....	11
1.2.4. Méthode capacimétrique .....	11
1.2.5. Méthode Trime Domain Reflectometry (TDR) .....	11
1.3. Description du code HYDRUS 2D/3D.....	11
1.3.1. Modèle de Brooks et Corey .....	13
1.3.2. Modèle de van Genuchten – Mualem .....	13
1.3.3. Etapes de la simulation sous HYDRUS .....	14
1.3.4. Extraction racinaire .....	14
II. MATERIEL ET METHODES .....	15
2.1. Milieu d'étude et dispositif expérimental.....	15
2.1.1. Description générale du milieu d'étude .....	15
2.1.2. Description du dispositif expérimental et conduite des essais .....	16
2.2. Etude des transferts d'eau sous les deux techniques culturales.....	18
2.2.1. Détermination du stock d'eau dans le sol .....	18
2.2.2. Simulation des flux d'eau sous HYDRUS .....	19
2.2.3. Détermination du temps de redistribution sous des scénarii de pluie .....	21
2.3. . Analyse statistique des données .....	22

III.	RESULTATS ET DISCUSSION .....	24
3.1.	Contribution du zai à la constitution du stock d'eau du sol.....	24
3.1.1.	<i>Evolution temporelle de la teneur en eau du sol .....</i>	24
3.1.2.	<i>Evolution temporelle du stock d'eau du sol dans la zone racinaire du maïs .....</i>	25
3.1.3.	<i>Rendement en grain du maïs selon les pratiques culturales.....</i>	27
3.2.	Simulation des transferts d'eau sous le zai.....	29
3.2.1.	<i>Evolution comparée de la teneur en eau mesurée et simulée .....</i>	29
3.2.2.	<i>Redistribution de l'eau sous le zai.....</i>	31
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	33
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	34

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Vue schématique du creusage du zaï (à gauche) et trous de zaï en milieu réel (à droite) .....	6
Figure 2: Demi-lunes sous les plants de sorgho .....	7
Figure 3: Les cordons pierreux.....	8
Figure 4 : Sonde à neutron .....	10
Figure 5: Situation de la zone d'étude .....	15
Figure 6 : Unités expérimentales et technique culturale correspondante.....	17
Figure 8 : Présentation du domaine de simulation .....	20
Figure 9 : Conditions initiale et limite sur le domaine de simulation .....	21
Figure 10 : Evolution de la teneur en eau du sol à 50 cm de profondeur selon les pratiques culturales .....	24
Figure 11 : Profils hydriques au 38 <sup>ème</sup> et 40 <sup>ème</sup> jour après semis sous les deux pratiques culturales .....	25
Figure 12: Variation du stock d'eau à 80 cm de profondeur selon la pratique culturale .....	26
Figure 13 : Evolution des teneurs en eau simulées et observées à 50 cm de profondeur.....	30
Figure 14 : Redistribution de l'eau sous le zaï après un cumul de pluie de 40 mm (à gauche) et 36 mm (à droite).....	31

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Principales propriétés physiques et chimiques de la couche arable.....	16
Tableau 2: Paramètres hydrauliques du sol d'étude selon le modèle de van Genuchten–Mualem.....	19
Tableau 3: Paramètres de Feddes pour la courbe d'extraction racinaire.....	20
Tableau 4. Rendement en grain du maïs et paramètres statistiques (kg.ha <sup>-1</sup> ) selon les pratiques culturales .....	27

## **LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS**

BUNASOLS: Bureau National des Sols

CD: Coefficient de détermination

INERA: Institut de l'environnement et des recherches agricoles

JAS: Jour après semis

RMSE: Root mean square error

RSR: Standard deviation ratio

## **RESUME**

La présente étude a été réalisée dans le Sahel Burkinabé et s'est donnée comme objectif d'analyser les flux d'eau sous le *zai*, une technique de réhabilitation développée au Sahel pour atténuer l'effet de la dégradation des sols et de la sécheresse sur la production agricole. Une analyse des transferts d'eau sous la technique de *zai* cultivée en maïs a été effectuée sur la base des données collectées dans le cadre du projet « Irrigation de Complément et Information Climatique » durant la campagne agricole de 2014-2015. Une simulation des transferts d'eau a été également faite à l'aide de HYDRUS-2D/3D afin de valider l'étude expérimentale des transferts d'eau sous le *zai* et d'étudier la redistribution de l'eau sous cette technique. Les résultats ont montré que le *zai* contribue jusqu'à 50% à l'augmentation du stock d'eau du sol. Le gain de rendement sous le *zai* a été de 1200 kg ha<sup>-1</sup>. Les simulations des transferts d'eau sous le *zai* ont montré une bonne concordance avec les teneurs en eau mesurées. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de détermination du modèle ont été estimés respectivement à 0,024 et 0,8. L'étude de la redistribution de l'eau sous le *zai* a montré qu'à la suite d'un événement pluvieux de 30 mm au moins, l'eau atteint les 80 premiers centimètres dans les 6 jours qui suivent. Ainsi, cette étude a révélé les potentialités du *zai* à améliorer les propriétés hydriques du sol.

## **Mots clés**

1. Variabilité climatique
2. Zai
3. Stock d'eau
4. HYDRUS
5. Sahel

## **ABSTRACT**

The present study was carried out in the Burkinabe Sahel and was given as objective of analysis of water flow under the *zai*, a technique of rehabilitation developed in the Sahel to mitigate the effect of the impoverishment of the soil and the effect of dry spell on the agricultural production. An analysis of the transfers of water under the technique of *zai* cultivated out of corn was carried out on the basis of the data collected within the framework of the project "Irrigation additional and Climatic Information" during the crop year of 2014-2015. A simulation of the water flow was also made using HYDRUS-2D/3D in order to validate the experimental study of the water transfer under the *zai* and study the water redistribution under this technique. The results showed that the *zai* contributes up to 50% in increasing soil water storage. The profit of output under the *zai* was 1200 kg ha<sup>-1</sup>. Water flow simulations under the *zai* showed a good agreement with the field water contents. The square root of the average mean error and the coefficient of determination of the model were estimated respectively at 0.024 and 0.8. The study of the water redistribution under the *zai* showed that following a rainy event of at least 30 mm, water reaches the first 80 centimeters in the following 6 days. Thus, this study revealed the potentialities of the *zai* to improve the hydric properties of the soil.

### **Keywords**

1. Climate variability
2. *zai*
3. Water storage
4. HYDRUS
5. Sahel

## **INTRODUCTION**

La lutte contre la dégradation du sol et la réhabilitation du couvert végétal au Sahel représente un enjeu majeur pour les populations. Dans cette région vulnérable aux aléas climatiques, la subsistance des populations repose essentiellement sur les ressources naturelles (eaux, sols, plantes). Or depuis une trentaine d'années, la dégradation des conditions écologiques du Sahel ne fait que s'accroître (Niang et al., 2012). Cette dégradation des ressources naturelles émane de la pression anthropique combinée à une agriculture extensive exacerbée par les sécheresses et les changements climatiques des décennies 1970 et 1980. Le dérèglement climatique et l'anthropisation ont entraîné d'après Roose et al. (1999) une dégradation des terres cultivables et la détérioration du régime hydrique des sols. Ces conditions édaphiques et hydriques du Sahel entretiennent le stress hydrique auquel est confrontée l'agriculture pluviale de cette région.

Dans le Sahel Burkinabé, la transpiration des cultures ne représente qu'une infime partie des précipitations. Dans ces zones agroclimatiques, les besoins en eau des cultures ne sont généralement pas couverts (Pala et al., 2007) malgré l'importance relative des précipitations annuelles (400 à 600 mm). La cause principale du faible indice de satisfaction des besoins en eau des cultures émane de l'importante perte d'eau dans les champs dénudés et quasi imperméables qui peut atteindre le seuil de 50 % de la pluie (Rockström et al., 2010). Au Burkina Faso l'agriculture extensive essentiellement pluviale est à l'origine de cette dégradation des terres agricoles (Roose et al., 1993). En effet, environ 90% des terres arables du Sahel Burkinabé sont fortement dégradées (INERA, 1994) entraînant ainsi une réduction de la surface agricole utile. Cette dégradation, conjuguée aux poches de sécheresse récurrente que connaît la zone depuis les années 70 (Servat et al., 1997) menacent la sécurité alimentaire des paysans sahéliens à moyen et long terme.

Face à ces variabilités pluviométriques et aux problèmes de dégradation des terres, les paysans sahéliens ont adoptés plusieurs stratégies pour la mobilisation de l'eau à l'échelle parcellaire (Reij et al., 1996; Roose et al., 1999; Lahmar et Yacouba, 2012). Ces pratiques paysannes apparues entre 1980 et 1985 et très exigeantes en temps de travail et efforts physiques, constituent néanmoins des alternatives novatrices pour le développement d'une agriculture résiliente au Sahel. La réhabilitation des terres dégradées au Burkina Faso a consisté à la promotion des pratiques culturales comme le *zai*, la demi-lune et les cordons pierreux favorisant l'infiltration de l'eau et réduisant par surcroît les sécheresses agricoles. Le

*zai*, la technique la plus répandue est une méthode de culture en poquets réalisée manuellement à l'aide de pioches (Ouedraogo et Kaboré, 1996; Lahmar et Yacouba, 2012). A cette technique s'ajoute celle de billonnage couplée aux cordons pierreux en courbe de niveau qui favorise l'infiltration de l'eau et l'amélioration du stock d'eau du sol. Sur le plan agronomique, ces techniques endogènes du Sahel Burkinabé ont fait leurs preuves dans la région (Reij et al., 1996). Hormis leurs performances agronomiques avérées dans l'amélioration des rendements céréaliers (Tabor, 1995; Singh et al., 1998; Ellis-Jones et Tengberg, 2000; Kaboré et Reij, 2004; Kayombo et al., 2004; Wakindiki et Ben-Hur, 2004; Pretorius et al., 2005), ces techniques ont permis la récupération de nombreuses terres marginales et la réduction des impacts liés aux séquences sèches (Rockström et al., 2004). En effet, Roose et al. (1993) ont montré qu'avec la technique du *zai*, les rendements du sorgho sont multipliés par environ 1,6 en saison humide alors qu'en saison plus sèche ce coefficient passe à 2,5. Ces résultats émanent de l'effet combiné de la rétention d'eau, du compostage et d'une fumure minérale d'appoint. En outre, des études ont rapporté sur la base des enquêtes ménages que ces techniques de collecte d'eau de surface recharge in situ la nappe souterraine (Woldearegay, 2002; Mutekwa et Kusangaya, 2006).

### ***Problématique***

Nombreuses sont les études qui ont été menées sur les techniques de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso dans le sens d'étudier leurs potentialités agronomiques. Cependant, aucune étude de modélisation n'a été menée dans le sens d'analyser la contribution des techniques de collecte d'eau de surface dans l'amélioration du stock d'eau et dans l'endiguement des poches de sécheresse. Cette situation résulte bien sûr de la complexité intrinsèque à l'étude expérimentale des transferts d'eau dans la matrice poreuse du sol surtout dans les techniques culturales comme le *zai* où les flux d'eau s'effectuent dans deux directions. Dès lors, l'utilisation d'un modèle adapté constitue le meilleur moyen d'appréhender et de valider l'étude expérimentale des transferts d'eau en milieu insaturé. Dans ce sens, le code HYDRUS-2D/3D (Simunek et al., 2012), un modèle mécaniste d'étude bidimensionnelle des transferts d'eau, de chaleur et de solutés, retenu dans le cadre de notre étude est bien adapté à l'analyse de la dynamique de l'eau sous la technique de *zai*. Ce code amplement discuté dans la littérature a été utilisé par plusieurs auteurs dans le cadre de l'étude des transferts d'eau et de substances chimiques sous une culture de maïs (Coquet et al., 2004; Arbat et al., 2013; Tafteh et Sepaskhah, 2012), dans les systèmes d'irrigation (Siyal et al., 2009; Siyal, et Skaggs, 2009; Mailhol et al., 2011) et en irrigation à la raie (Siyal et al., 2012).

Roberts et al. (2008 et 2009), Ramos et al. (2011 et 2012) se sont servi de ce modèle pour améliorer l'efficacité de l'irrigation dans les régions où l'eau est une ressource rare. Cependant, peu d'études de simulation à l'aide de HYDRUS n'a été effectuée sur les transferts d'eau sous la technique de *zai* en zones sahélienne.

Ainsi, la question centrale de recherche formulée dans le cadre de cette étude est « qu'elle est la contribution de la pratique du *zai* à l'amélioration des propriétés hydro-physique du sol et quel est l'apport de la modélisation à l'étude des flux d'eau sous cette technique ? ».

### ***Objectifs de l'étude***

L'objectif principal de ce présent travail est d'étudier l'efficacité de la technique du *zai* dans un contexte de variabilité climatique en zone sahélienne Burkinabé afin de préciser spécifiquement:

- i) la contribution du *zai* à la constitution du stock d'eau du sol ;
- ii) l'impact du *zai* sur la production des céréales ;
- iii) le temps de redistribution de l'eau sous le *zai* sous des scénarii de pluie.

### ***Hypothèse de recherche***

L'hypothèse formulée dans le cadre de cette étude est que la technique de *zai* augmente le stock d'eau du sol tout en atténuant les effets des sécheresses édaphiques en agriculture pluviale.

### ***Plan du mémoire***

Pour atteindre les objectifs et hypothèses assignés par cette étude, une analyse des transferts d'eau sous la technique de *zai* a été effectuée sur la base des données collectées dans le cadre du projet « Irrigation de Complément et Information Climatique » durant la campagne agricole 2014-2015 dans le Sahel Burkinabé. Une simulation des transferts d'eau a été également faite à l'aide de HYDRUS-2D/3D pour valider l'étude expérimentale à laquelle nous n'avons pas participé et déterminer pour des scénarii de remplissage des trous de *zai*, le temps de redistribution de l'eau sous cette technique culturelle.

Le présent document est articulé en deux parties principales. La première partie traite de la description de la zone d'étude, du protocole expérimental adopté pour la collecte des données ainsi que la méthodologie de mise en œuvre des simulations de transferts d'eau sous le *zai* à l'aide de HYDRUS-2D/2D. La deuxième quant à elle est consacrée à la présentation des résultats obtenus in situ et par simulation. Une discussion des outputs a été faite dans cette

**Etude des transferts d'eau sous les techniques de réhabilitation des sols dégradés au Sahel  
Burkinabé: cas du zai**

---

partie afin de situer nos résultats par rapport aux études antérieures relatives aux transferts d'eau dans le sol. La conclusion synthèse les principaux résultats ainsi que les perspectives de recherche, en particulier en ce qui concerne l'impact quantitatif de la technique du *zai* sur la dynamique de la nappe phréatique sous-jacente.

## **I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1.1. Techniques de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso**

Au Burkina Faso, les sols ferrugineux tropicaux constituent 85% des sols du Burkina Faso. Ces sols pauvres sont faibles en matière organique, azote, phosphore et potassium de sorte que les rendements agricoles sont faibles. Une baisse du volume pluviométrique a été observée ces dernières décennies (Diouf et al., 2000). Même lorsqu'il pleut, l'intensité des pluies fait en sorte que les ruissellements décuplent la couche arable entraînant ainsi une dégradation des terres. Cette dégradation des terres résulte de plusieurs facteurs, parmi lesquels les activités humaines et les catastrophes provoquées par les variations climatiques, comme les sécheresses et les inondations. Ces facteurs entraînent une disparition progressive de la végétation et une importante dégradation chimique et physique des terres cultivées (Calvet, 2003). Les caractéristiques se résument en une perte de structure, la formation d'une couche de battance en surface, une réduction de perméabilité, une augmentation de la compacité, le manque d'aération, la limitation de l'enracinement (Calvet, 2003; Zougmore et al., 2003). Les corollaires sont un dérèglement du régime hydrique du sol et l'apparition d'un pédoclimat présentant une aridité prononcée (Ambouta et al., 1996). Lorsqu'elle survient dans des zones arides où la productivité est limitée en raison du manque d'eau, cela s'appelle la désertification.

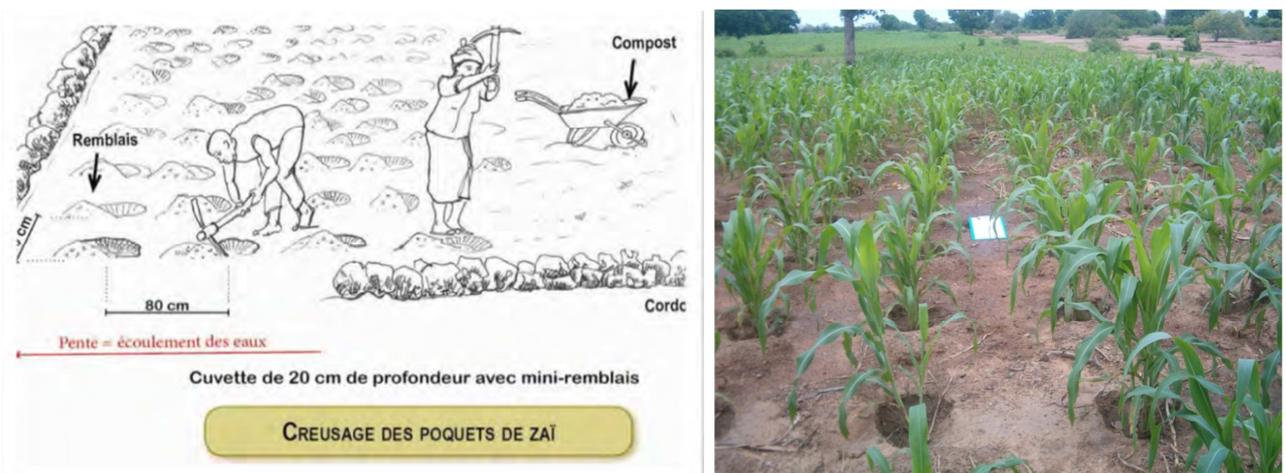
Au Burkina Faso, l'accentuation du phénomène d'érosion a abouti à la longue à l'apparition de sols dénudés et indurés appelés zipellé. La dégradation des terres demeure de nos jours un problème majeur pour le développement agro-Sylvio-pastoral des zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest (Hauchart, 2007). Les conditions pédoclimatiques défavorables (pauvreté naturelle des sols en sels minéraux, en matières organiques et l'insuffisance de la pluie) de la zone soudano-sahélienne et les processus continus de dégradation des sols (notamment aux érosions éolienne et hydrique) rendent très difficile la croissance des plantes cultivées (Nicou et Chopart, 1995) et réduisent considérablement les rendements agricoles (Belemvire et al., 2008). Par ailleurs, compte tenu des extrêmes irrégularités du climat, l'un des premiers problèmes à résoudre pour le cultivateur est celui de l'alimentation hydrique de ses cultures annuelles, d'où le recours à différentes techniques de conservations des eaux et des sols.

Le Burkina Faso a entrepris d'importants efforts aux plans politique, technique et social en vue d'inverser la tendance de dégradation accélérée des terres. C'est ainsi que de nombreuses

techniques de récupération des terres ont été développées ou expérimentées notamment dans la partie Nord du Burkina Faso. Ces technologies de conservation des eaux et des sols ont été largement documentées et diffusées (Reij, 1983). Les technologies les plus utilisées par les acteurs dans la zone de l'étude sont : le *zaï*, la demi-lune et les cordons pierreux.

### **1.1.1. Description du zaï**

Le *zaï*, en moré, signifie « se lever tôt pour préparer sa terre » ou encore « casser et émietter la croûte du sol avant les semis » (Kaboré, 1994). Le *zaï* est une forme particulière de culture en poquet permettant de concentrer l'eau de ruissellement et la fumure organique dans des micros bassins de 0,2 à 0,4 m de diamètre et de 0,1 à 0,2 m de profondeur (Figure 1).



**Figure 1** : Vue schématique du creusage du *zaï* (à gauche) et trous de *zaï* en milieu réel (à droite)

Les trous espacés d'environ 0,7 à 1,5 m et dont les déblais sont disposés en courbe de niveau sous forme de croissant en aval des trous afin de limiter l'érosion et piéger dans les poquets les sables, limons et matières organiques transportés par le vent, constituent d'importante surface de captage des eaux de surface sur un impluvium de 1% environ. Les trous sont creusés pendant la saison sèche. Ils sont partiellement remplis d'une certaine quantité de matière organique, ce qui est nécessaire pour améliorer la porosité et la capacité d'infiltration de l'eau du sol à travers l'activité des termites lors de la saison sèche (Lahmar et Yacouba, 2012). La quantité de fumure organique recommandée est de 0,6 kg par trous de *zaï*. Les avantages de la pratique du *zaï* sont multiples et peuvent se résumer comme suit :

- Restauration des propriétés hydro-physiques du sol grâce à son potentiel de conservation des eaux et des sols puis du contrôle de l'érosion;

- Augmentation de la production agricole.

### ***1.1.2. Description des demi-lunes***

Les demi-lunes sont des cuvettes en demi-cercle creusées et ceinturées avec les déblais disposés en arc de cercle ouvert à l'amont (Figure 2). Le creux recueille l'eau piégée par les bras de la demi-lune. L'amont du creux sert d'impluvium. Elles permettent aux plantes cultivées dans la demi-lune de recevoir beaucoup plus d'eau que ne lui apportent directement les pluies. La demi-lune peut avoir un rayon allant de 2 à 3 mètres et une profondeur de 30 à 40 cm.



**Figure 2:** Demi-lunes sous les plants de sorgho

### ***1.1.3. Description des cordons pierreux***

Les cordons pierreux sont des barrières mécaniques d'arrêt ou de freinage des eaux de ruissellement placées le long des courbes de niveau, pour réduire l'érosion et augmenter le stock en eau du sol (Figure 3). Les pierres sont disposées dans des tranchées de 10-15 cm de profondeur. La largeur d'un cordon est d'environ 15-20 cm ; sa longueur varie entre 10-30 m. La technique présente des avantages relatifs à sa simplicité et au fait qu'elle est facilement maîtrisée par les producteurs. De plus, la décomposition des résidus végétaux piégés permet la fertilisation des sols. Ce qui peut augmenter ainsi les rendements des cultures de l'ordre de 210 kg/ha (Ouédraogo et al, 2007). Aussi, grâce à l'activité des termites qui creusent des galeries dans les sols, la porosité et la perméabilité du sol augmentent de façon considérable.

Cette activité microbienne couplée à la fertilisation issue des résidus de végétaux créent des conditions plus favorables pour la végétalisation.



**Figure 3:** Les cordons pierreux

## **1.2. Méthodes de mesure de l'humidité du sol**

Dans un objectif d'agriculture de réhabilitation, il est important d'établir les points de repère sur les moyens pouvant être mis en œuvre pour la caractérisation des sols. Les caractéristiques physico-chimiques du sol sont une composante majeure du rendement des cultures et peuvent présenter une variabilité spatiale et temporelle importante. Il participe à l'établissement du rendement des cultures par sa capacité de réserve en eau et en éléments nutritifs, et par sa fonction de support physique pour l'enracinement des plantes (Douzals, 2000). L'humidité du sol se définit comme la quantité d'eau contenue dans le sol. Le taux d'humidité d'un sol va en particulier déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques concernent aussi bien les intrants solides que liquides qui vont pénétrer dans le sol. L'humidité joue un rôle important dans le maintien de la vie sur Terre, sa première utilisation est de permettre la croissance de la végétation. Elle conditionne également la mise en place du peuplement végétal à travers la germination des semences, l'émergence et la mise en place du système racinaire. Une connaissance de l'humidité est la clé pour apporter la bonne quantité d'eau aux cultures, au bon moment (Shortt et al ; 2012). Elle constitue aussi une alerte à la désertification. La quantité d'eau retenue dans le sol est exprimée en volume ou en masse, rapporté à un volume ou une masse de référence.

Il existe plusieurs définitions de la teneur en eau :

1. Teneur en eau massique  $\omega$
2. Teneur en eau volumique  $\theta$
3. Indice d'eau  $I_e$

Ces divers paramètres sont liés par les relations suivantes :

$$\frac{\omega}{\theta} = \frac{\rho_e}{\rho_a}, \quad \frac{\omega}{I_e} = \frac{\rho_e}{\rho_s}, \quad \frac{\theta}{I_e} = \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (1)$$

Où  $\rho_e$  et  $\rho_s$  sont respectivement la masse volumique de l'eau et la masse volumique du matériau solide.

$\rho_e = 998,207 \text{ kg m}^{-3}$ , en pratique la valeur  $\rho_e = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  est souvent considérée.

$\rho_s$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) dépend de la nature des minéraux. La valeur moyenne de  $2,65 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  est généralement admise.

$\rho_a$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) est la masse volumique apparente de l'échantillon défini par :

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_a} \quad (2)$$

avec  $M_s$  la masse du matériau solide et  $V_a$  le volume apparent.  $\rho_a$  est le plus souvent comprise entre  $1,3$  et  $1,6 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ .

Pour la détermination de l'humidité du sol, plusieurs méthodes sont couramment utilisées. Ces méthodes sont généralement classées en deux groupes : méthodes directes et méthodes indirectes.

### **1.2.1. Méthode gravimétrique:**

Cette méthode consiste à prélever un volume connu de matériau terreux et déterminer la masse d'eau qu'il contient. Elle consiste à déterminer la proportion d'eau (équation 2) contenue dans un échantillon de sol de masse  $M_h$  après passage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ . C'est une méthode de référence, mais longue, coûteuse et destructive à cause des prélèvements des échantillons.

$$\omega = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

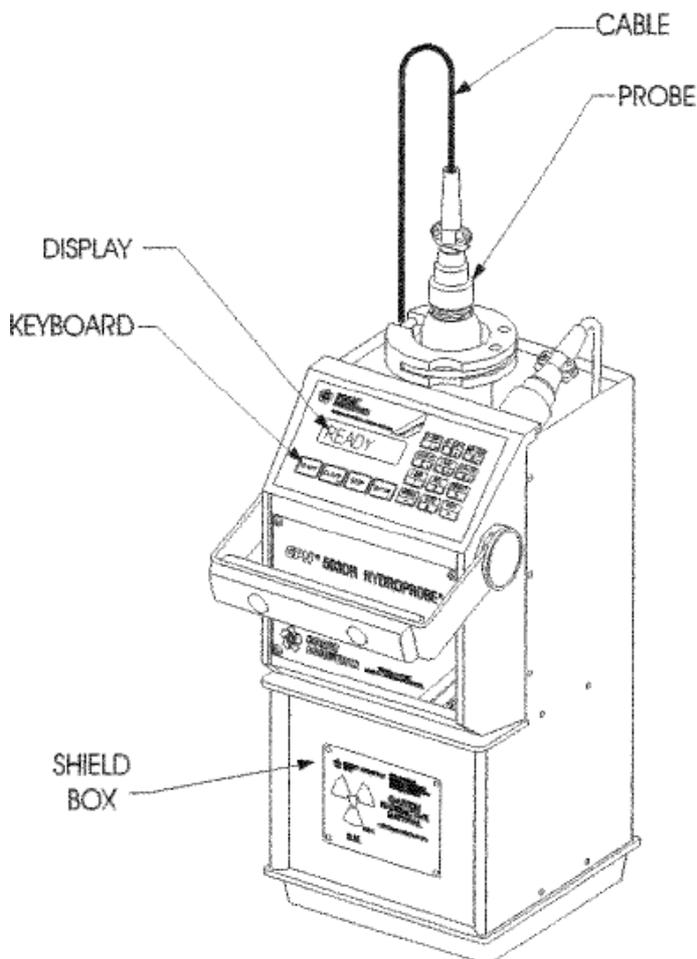
où  $M_h$  (g) est la masse de l'échantillon de sol humide ;  $M_s$  (g) est la masse de l'échantillon de sol sec après passage à l'étuve et  $\omega$  (%) est la teneur en eau pondérale.

Une fois l'humidité pondérale obtenue, celle-ci peut être transformée en teneur en eau volumique à travers l'équation (4).

$$\theta = \omega \times \rho_a \quad (4)$$

### **1.2.2. Méthode par sonde à neutrons**

L'humidité du sol est mesurée à l'aide d'un humidimètre neutronique couramment appelé sonde à neutron (Figure 4). Elle consiste à implanter dans le sol des sondes qui émettent des neutrons, ces neutrons entrent en collision avec les atomes des constituants du sol. Quand les collisions ont lieu avec les atomes d'hydrogène, ils subissent des chocs. Ces chocs ne sont pas élastiques et diminuent la vitesse des neutrons jusqu'à des valeurs correspondant à celle de l'agitation thermique. Les neutrons ainsi ralentis sont appelés des neutrons thermiques et leur nombre dépend de la quantité d'hydrogène présents dans le milieu ou se fait l'émission et donc de la masse d'eau présente. Pour une source donnée de neutrons il suffit de déterminer la correspondance entre le nombre d'électron ralentis et la teneur en eau par l'étalonnage par l'établissement d'une courbe d'étalonnage. Cette méthode reste particulièrement efficace mais chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil) pour être utilisée simplement par un opérateur.



**Figure 4 :** Sonde à neutron

### ***1.2.3. Méthode par mesure de la conductivité électrique***

La méthode consiste à implanter dans le sol deux ou plusieurs électrodes. Une différence de potentiel électrique est appliquée entre les électrodes pour mesurer l'intensité du courant électrique qui traverse le matériau situé entre les électrodes. Ce qui permet de calculer la conductivité, la résistance, résistivité électrique correspondante. Il faut procéder qu'un étalonnage préalable de l'instrument est nécessaire pour obtenir la relation entre résistivité et la teneur en eau. Cette méthode reste fortement influencée par la nature du sol et la salinité des sols.

### ***1.2.4. Méthode capacimétrique***

C'est une méthode électromagnétique qui consiste à confectionner un condensateur avec deux pièces métalliques en utilisant le milieu poreux comme diélectrique. Ce condensateur est connecté à un circuit oscillant qui permet la mesure de la capacitance du circuit ainsi constitué (mesure de la permittivité diélectrique). La relation entre capacité électrique du milieu et la teneur en eau est également établie par étalonnage. La méthode est influencée par le type de sol, la température et la salinité.

### ***1.2.5. Méthode Trime Domain Reflectometry (TDR)***

Le principe de cette mesure est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique le long d'une électrode introduite dans le sol. Le temps de propagation de ce pulse dépend étroitement de l'humidité du sol (mesure de permittivité diélectrique). Son volume d'influence est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol. Avec les techniques électromagnétiques (Capacitive et TDR) on mesure la teneur volumique en eau d'un sol ou humidité volumique:

## **1.3. Description du code HYDRUS 2D/3D**

Un modèle peut être défini comme une construction permettant de représenter de manière plus ou moins complète et complexe certains aspects de processus réels. Les modèles peuvent être physiques (maquettes, bancs d'essais, etc.) ou abstraits (modèles mathématiques basés sur des équations).

Les modèles mathématiques peuvent être représentés par une ou plusieurs équations décrivant les processus qui interviennent dans le fonctionnement du système modélisé. Ils prennent très souvent la forme de programmes informatiques. L'informatique permet de recourir à des modèles d'une grande complexité prenant en compte de très nombreux processus. Ceci

permet d'atteindre de nouvelles frontières que ne permet pas l'expérimentation vu que, théoriquement que le temps et l'espace ne constituent guère une limite. Cependant, quelle que soit sa complexité, un modèle n'est qu'un schéma, très imparfait et très simplifié de la réalité. L'expérimentation reste donc indispensable et le chercheur se doit de combiner, autant que possible, les aspects théoriques, expérimentaux et la modélisation. Dans ce qui suit le terme modèle s'appliquera essentiellement à la forme abstraite.

HYDRUS 2D/3D est un modèle mathématique qui permet de simuler le transport d'eau, de chaleur et de substances chimiques en deux ou trois dimension dans un milieu insaturé. HYDRUS est un modèle de type mécaniste, numérique, déterministe. Le profil de sol est décrit à l'aide de couches superposées, homogènes et isotropes. Chaque couche est divisée en compartiments et les informations suivantes doivent être introduites dans le modèle :

- le nombre de couches du profil du sol,
- l'épaisseur des compartiments,
- la masse volumique du sol si le transport de solutés ou le transfert de chaleur est simulé,
- la période et le pas de temps utilisé pour la simulation.

Bien que, comme déjà indiqué, HYDRUS 2D/3D permet de simuler également le transport bidimensionnel de substances solubles et de chaleur et, vu les objectifs de la modélisation orientée vers une gestion optimale des irrigations, seule la simulation des transferts d'eau unidirectionnels verticaux est considérée par la suite.

HYDRUS 2D/3D décrit les transferts d'eau en milieu poreux rigide et incompressible, en négligeant l'effet de la phase gazeuse, sur la base de l'équation de Richards (5) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K(h) \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz} \right) \right] - S \quad (5)$$

Où  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) est la teneur en eau volumique,  $h$  (cm) est la charge de pression,  $t$  (s) le temps  $x_i$  (cm) ( $i = 1$  et  $2$ ) représente le vecteur spatial,  $K(h)$  ( $\text{cm} \cdot \text{j}^{-1}$ ) la fonction de conductivité hydraulique,  $S$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$ ) l'extraction racinaire,  $K_{ij}$  [-] représente les composantes de la conductivité hydraulique du tenseur anisotropique. Pour un écoulement plan en coupe verticale ( $x_1 = x$ , coordonnée horizontale et  $x_2 = z$ , coordonnée verticale) dans un sol supposé isotrope, le tenseur hydraulique est diagonal et  $K_{xx} = K_{zz} = 1$ .

Cinq fonctionnalités (Brooks et Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Vogel et Císlerová, 1988; Kosugi, 1996; Durner, 1994) sont disponibles sous HYDRUS pour décrire les propriétés

hydrodynamiques du sol. Parmi ces fonctionnalités celles de Brooks et Corey (1964) et de van Genuchten – Mualem (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) sont les plus utilisées.

### **1.3.1. Modèle de Brooks et Corey**

Cette fonctionnalité est définie par les équations (6) et (7):

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^n & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases} \quad (6)$$

et

$$K(h) = K_s S_e^{2/n+1+2} \quad (7)$$

avec :  $S_e$ , la saturation relative d'une matrice poreuse définit par :  $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} [-]$ ,  $0 \leq S_e \leq 1$

$\alpha$ , l'inverse de la pression d'entrée d'air [ $L^{-1}$ ],

$K_s$ , la conductivité hydraulique à saturation [ $L.T^{-1}$ ],

$n$ , l'indice de distribution de taille des pores [ ],

$l$ , paramètre de connectivité des pores [ ],

$\theta_r$ , teneur en eau volumique résiduelle [ $L^3.L^{-3}$ ],

$\theta_s$ , teneur en eau volumique à saturation [ $L^3.L^{-3}$ ]

Les coefficients  $\alpha$ ,  $n$  et  $l$  sont considérés dans HYDRUS comme des paramètres empiriques qui affectent la forme des fonctions de conductivité hydraulique. Ils proviennent de l'ajustement des fonctions aux résultats expérimentaux.

### **1.3.2. Modèle de van Genuchten – Mualem**

Il s'agit du modèle de van Genuchten (1980) couplé à la condition de Mualem (1976). Il est défini par les équations (8) et (9) :

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

et

$$K(h) = K_s S_e^1 \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (9)$$

où  $m$  représente un coefficient empirique dans la condition de Mualem définit par:

$$m = 1 - 1/n, \text{ avec } 0 < m \leq 1 \text{ et } n > 1.$$

Selon Bastet et al.(1998) le modèle analytique de van Genuchten a la particularité de mieux rendre compte de l'existence du point d'inflexion sur les courbes de rétention hydrique et des changements de pente autour de ce dernier.

### ***1.3.3. Etapes de la simulation sous HYDRUS***

D'après Šimůnek et al. (2012) la simulation numérique sous HYDRUS passe en amont par les étapes suivantes :

Étape 1 : La construction du maillage prenant en compte les particularités de la géométrie du domaine de simulation et peut être raffinée localement là où le phénomène à analyser est susceptible de varier rapidement (en général, à proximité de la surface humide en irrigation à la raie) ;

Étape 2 : La définition des conditions initiales et aux limites afin de définir l'état initial du sol et les contraintes à la frontière du domaine pendant la simulation. Ces conditions peuvent être précisés en terme de pression de charge (condition de type Dirichlet) ou flux imposés (condition de type Neumann) sur une partie de la frontière ;

Étape 3 : La discrétisation des équations de transferts sur le maillage basée sur la méthode des éléments finis de Galerkin;

Étape 4 : Leur résolution qui se résume, après utilisation des éléments finis, à une itération de résolutions numériques d'un système linéaire.

### ***1.3.4. Extraction racinaire***

La transpiration végétale représentée dans l'équation (5) par  $S$  est modélisée sous HYDRUS comme un paramètre puits de l'équation de conservation de masse. Elle peut être définie comme étant le volume d'eau extraite par les racines de la plante par unité de volume de sol et par unité de temps. L'extraction racinaire est calculée en utilisant l'approche macroscopique introduite par Feddes et al. (1978). Des détails sur l'approche peuvent être consultés dans les travaux de ces auteurs.

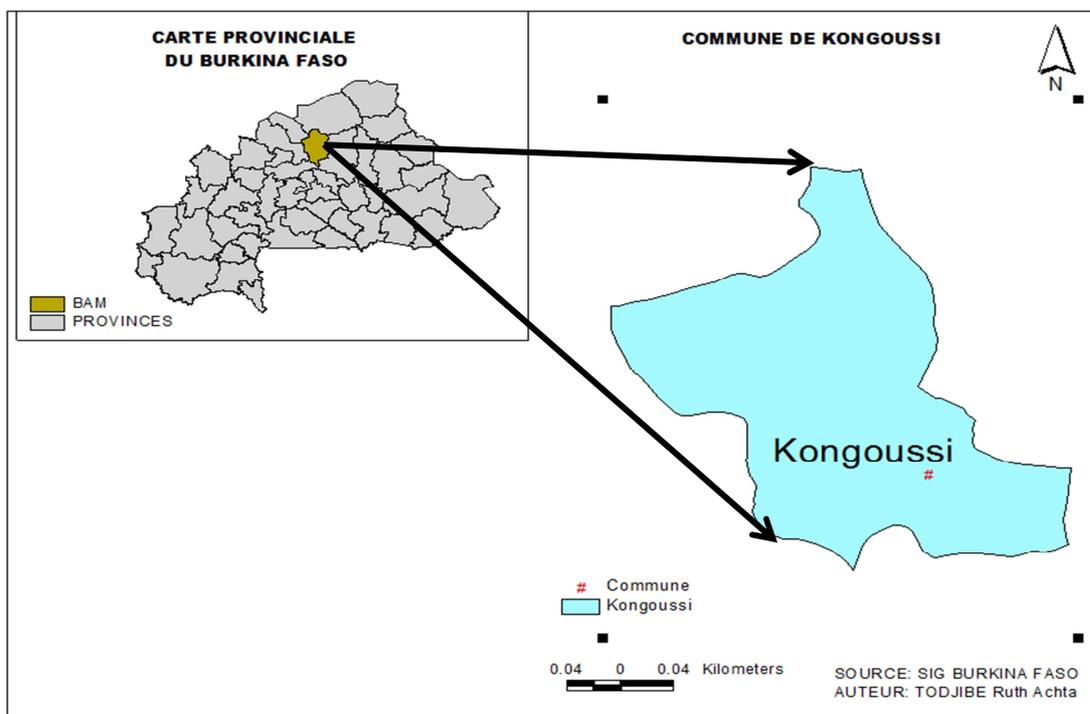
## **II. MATERIEL ET METHODES**

Cette partie s'est intéressée à la méthodologie adoptée pour l'étude des flux d'eau sous la technique de *zai*. Elle débute par la présentation du milieu d'étude à travers ses caractéristiques pédoclimatiques. Cette présentation est suivie de la description du protocole expérimental de mesure ainsi que le modèle utilisé et la mise en œuvre des simulations.

### **2.1. Milieu d'étude et dispositif expérimental**

#### **2.1.1. Description générale du milieu d'étude**

L'étude a été réalisée dans la province du Bam plus précisément la commune de Kongoussi située dans la zone sahélienne du Burkina Faso, un pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest (Figure 5). La commune de Kongoussi est soumise à un climat tropical soudano-sahélien. Ce climat se traduit par l'alternance de deux saisons. Une longue saison sèche allant de novembre à mai et une saison pluvieuse de juin à septembre voire octobre. La pluie moyenne annuelle est d'environ 600 mm. Cependant, derrière ce chiffre se cache une forte variabilité interannuelle des pluies et une mauvaise répartition intra saisonnière. L'évapotranspiration annuelle peut atteindre une valeur plafond de 2900 mm durant l'année pour une maximale journalière de 5 mm durant la campagne agricole.



**Figure 5:** Situation de la zone d'étude

Cinq groupes de sols ont été identifiés dans la province du Bam d'après le BUNASOLS (1992). Il s'agit des :

- sols minéraux bruts (lithosols sur cuirasse surtout), plus ou moins durs et peu profonds, inaptes aux cultures (12,44 % des surfaces);
- sols peu évolués plus répandus présentant un horizon humifère de 20 cm (57,12 % des superficies) et susceptibles de se prêter aux activités agricoles en utilisant des pratiques de conservation des eaux et des sols;
- sols ferrugineux lessivés profonds (10,66 % des superficies), situés sur glacis moyens et ayant en commun une fertilité chimique faible à moyenne. Ils sont sensibles à l'érosion;
- association de sols bruns et de sols ferrugineux. Ce groupe rassemble des sols d'une profondeur satisfaisante (80 à 120 cm), mais ne représente que 0,29 % des superficies.
- les sols hydromorphes associés à des sols ferrugineux qui occupent 19,49 % des surfaces.

La couche arable du site expérimental a une texture sablo-limoneuse dont les caractéristiques physico-chimiques sont consignées au Tableau 1.

**Tableau 1:** Principales propriétés physiques et chimiques de la couche arable

<b>Paramètres chimiques</b>	<b>Valeurs</b>	<b>Paramètres physiques</b>	<b>Valeurs</b>
Matière organique totale (%)	1,016	Sable (%)	51,96
Carbone total (%)	0,589	Limon (%)	30,39
Azote total (%)	0,046	Argile (%)	17,65
Calcium (méq/100g)	3,64	pH	6,45
Magnésium (méq/100g)	1,46	Humidité <sub>pF4,2</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,08
Potassium (méq/100g)	0,55	Humidité <sub>pF2,5</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,22
Sodium (méq/100g)	0,07	Conductivité électrique (µs/cm)	49,9
CEC (méq/100g)	8,58	Densité apparente	1,6
Taux de saturation (S/T in %)	67		

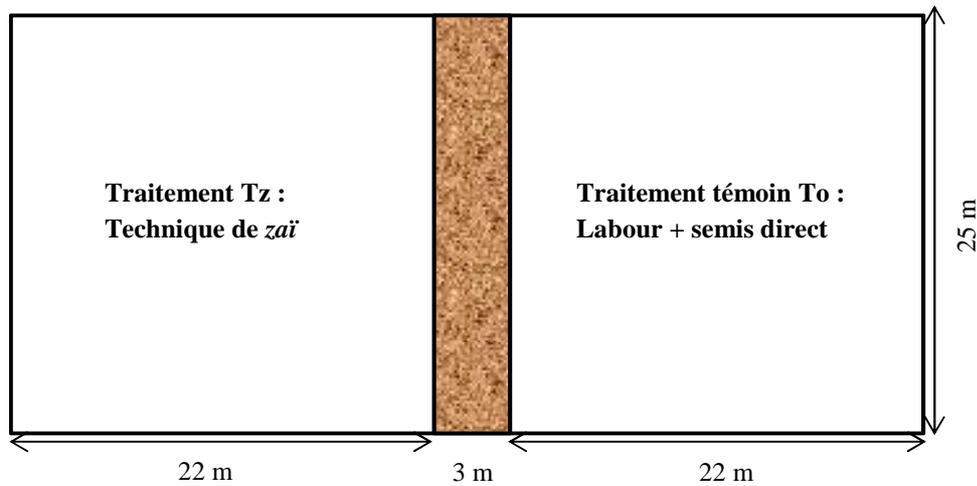
L'analyse de ce tableau montre que les sols du Bam ont un faible taux de matière organique et en éléments nutritifs.

### **2.1.2. Description du dispositif expérimental et conduite des essais**

#### **❖ Les unités expérimentales**

Le dispositif expérimental a été installé dans le cadre du projet « Irrigation de complément et Information Climatique. Deux traitements ont été conduits sur une parcelle de 1175 m<sup>2</sup> correspondant à deux pratiques culturales courantes dans le milieu: le labour + semis direct manuel dénommé traitement témoin To et le zaï dénommé traitement Tz comme représentées

à la Figure 6. Chaque unité expérimentale affectée à chaque traitement a une superficie de 550 m<sup>2</sup>. Les deux unités expérimentales sont séparées par une allée de 3 m de large.



**Figure 6** : Unités expérimentales et technique culturale correspondante

#### ❖ **Matériel végétal et itinéraire technique**

Cette étude a porté sur la culture de maïs (*Zea mays* (L.)). La variété utilisée était le *Barka*, une variété à cycle court (80 jours) qui est une semence améliorée fournie par l'Institut de l'Environnement et Recherches Agricoles (INERA) présentant une forte capacité de résistance à la sécheresse et un rendement potentiel de l'ordre de 5000 kg ha<sup>-1</sup>. Au début de la campagne, le champ expérimental (To et Tz) a reçu un apport de fumure organique puis il a été labouré à la charrue sur To. Sur Tz la fumure organique est directement déposée dans les trous de *zai*. Le maïs a été semé le 23 juin 2014 avec une maille de 0,8 m x 0,4 m. La fertilisation minérale a consisté à un apport de 200 kg ha<sup>-1</sup> de NPK (14-23-14) le 12<sup>ème</sup> jour après semis (JAS) et 150 kg h<sup>-1</sup> d'urée dont les deux tiers au 25<sup>ème</sup> JAS et le reste 10 jours plus tard. Le démariage à deux plantes par poquet a été effectué à la levée. Le sarclo-binage et le buttage ont été réalisés régulièrement.

Pour l'évaluation du rendement en grain du maïs, trois carrés de rendement de 1 m<sup>2</sup> chacun ont été installés par unité expérimentale. Les grains récoltés ont été séchés à l'air libre jusqu'à 10 à 13 % d'humidité puis pesés à l'aide d'une balance électronique de précision (0,01g).

#### ❖ **Mesure de la teneur en eau du sol sous les deux pratiques culturales**

Diverses techniques permettent de mesurer la teneur en eau d'un sol. Ces techniques sont classées en deux groupes (Calvet, 2003): la méthode directe ou gravimétrique effectuée généralement au laboratoire sur des échantillons remaniés et les méthodes indirectes réalisées in situ et qualifiées de méthodes non destructives. Parmi les méthodes dites indirectes, deux

variantes sont isolées: la méthode par mesures nucléaires (sonde à neutrons, rayonnement gamma) et la méthode par mesure diélectrique (la méthode capacitive, la méthode TDR). Dans le cadre de l'étude, c'est la méthode indirecte qui a été retenue compte tenu de son caractère non destructive et de la possibilité de réaliser un suivi continu de l'humidité du sol en un même point. Ainsi, l'évolution temporelle de la teneur en eau du sol a été suivie à l'aide d'un humidimètre neutronique ou sonde à neutron. L'utilisation de la sonde à neutron nécessite un étalonnage préalable de l'instrument de mesure. Cet étalonnage consiste à réaliser un ajustement linéaire de l'évolution de la teneur en eau du sol obtenue par la méthode gravimétrique et le comptage relatif obtenu via la sonde à neutron au même point de mesure et à la même date. L'équation d'étalonnage se présente comme suit:

$$\theta = an + b \quad (10)$$

Où  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) est la teneur en eau volumique du sol, a et b sont les constantes déterminées lors de l'ajustement linéaire du nuage de points (n,  $\theta$ ) obtenus sous des humidités contrastées, n [-] représente le comptage réduit ou relatif défini par:

$$n = \frac{N}{N_0} \quad (11)$$

Avec N le comptage absolu obtenu avec la sonde à neutron et  $N_0$  le comptage standard déterminé dans une eau de référence.

Pour le suivi journalier de la teneur en eau du sol, trois tubes d'accès neutronique ont été installés par traitement. Ces tubes d'accès installés dans les trous de *zai* et sur les lignes de semis pour la technique de labour + semis direct ont été utilisés pour suivre la redistribution de l'eau tous les 0,1 m jusqu'à 1 m de profondeur. Cette profondeur de référence a été retenue compte tenu de l'enracinement maximale du maïs qui peut aller jusqu'à 0,8 m dans les sols profonds de la zone d'étude (Doto et al., 2015).

## **2.2. Etude des transferts d'eau sous les deux techniques culturales**

L'étude des transferts d'eau sous les deux techniques culturales ( $T_0$  et  $T_z$ ) a été abordée sous deux aspects: détermination du stock d'eau dans la zone racinaire du maïs et simulation des flux d'eau à l'aide du code HYDRUS.

### **2.2.1. Détermination du stock d'eau dans le sol**

Le stock d'eau dans le sol représente la quantité d'eau emmagasinée sur une épaisseur de couche donnée. Il dépend de la teneur en eau actuelle du sol et de la profondeur sur laquelle

cette grandeur sera déterminée. Dans le cadre de notre étude, la teneur en eau a été mesurée tous les 0,1 m et concernait les couches : 0-0,15 ; 0,15-0,25 ; 0,25-0,35 ; 0,35-0,45 ; 0,45-0,55 ; 0,55-0,65 ; 0,65-0,75 ; 0,75-0,85 et 0,85-0,95 m correspondant respectivement aux profondeurs de mesure 0,15 ; 0,20 ; 0,30 ; 0,40 ; 0,50 ; 0,60 ; 0,70 ; 0,80 et 0,90 m. Ainsi, le stock d'eau du sol de la surface jusqu'à la profondeur maximale d'enracinement du maïs a été déterminé à partir de l'expression suivante (Doto et al., 2015):

$$WS = (\theta_{10} \times 150) + (\theta_{20} \times 100) + (\theta_{30} \times 100) + \dots + (\theta_{80} \times 50) \quad (12)$$

Où WS (mm) est le stock d'eau du sol,  $\theta_{10}$ ,  $\theta_{20}$ , ...  $\theta_{80}$  sont les teneurs en eau du sol aux profondeurs 10, 20.....et 80 cm.

### 2.2.2. Simulation des flux d'eau sous HYDRUS

Dans une perspective de validation et de spatialisation des résultats expérimentaux, notre étude s'est attelée à simuler les flux d'eau sous HYDRUS-2D/3D.

#### ❖ Equation gouvernant les flux d'eau et calage des paramètres hydrauliques du sol

La simulation des flux d'eau a été réalisée uniquement pour la technique de *zai*. L'étude des flux d'eau sous HYDRUS-2D/3D (Šimůnek et al., 2012) est basée sur l'équation de Richards (Eq.5), issue de la combinaison de l'équation de continuité et de l'équation de Darcy (1856) généralisée aux milieux non saturés et incorporant un terme puits S représentant les extractions racinaires.

Le calage des paramètres de la fonction de van Genuchten-Mualem a été effectué via le réseau neurone de Rosetta (Schaap et al., 2001) sur les données expérimentales de la campagne agricole 2013-1014. Ces différentes valeurs, déterminées sur la base des caractéristiques granulométriques et de la densité apparente du sol sont renseignées au Tableau 2.

**Tableau 2:** Paramètres hydrauliques du sol d'étude selon le modèle de van Genuchten–Mualem

Layer (cm)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n [-]	$K_s$ (cm.d <sup>-1</sup> )	l [-]
<b>0 - 15</b>	0,05	0,39	0,02	1,42	23,76	0,5
<b>15- 30</b>	0,06	0,40	0,02	1,40	11,89	0,5
<b>30 - 50</b>	0,07	0,40	0,02	1,40	9,87	0,5
<b>50 – 70</b>	0,08	0,41	0,02	1,31	6,64	0,5
<b>70 - 100</b>	0,08	0,41	0,02	1,29	6,99	0,5

**Etude des transferts d'eau sous les techniques de réhabilitation des sols dégradés au Sahel  
Burkinabé: cas du zaï**

Les paramètres de la fonction de prélèvement d'eau par les racines sont tirés des travaux de Wisseling (1991) pour le maïs. Les valeurs caractéristiques de la charge de pression de la fonction de réponse au stress hydrique conformément au modèle de Feddes et al. (1978) sont renseignées au Tableau 3. La dynamique racinaire est obtenue grâce à des rhizostomes installés sur une profondeur de 100 cm.

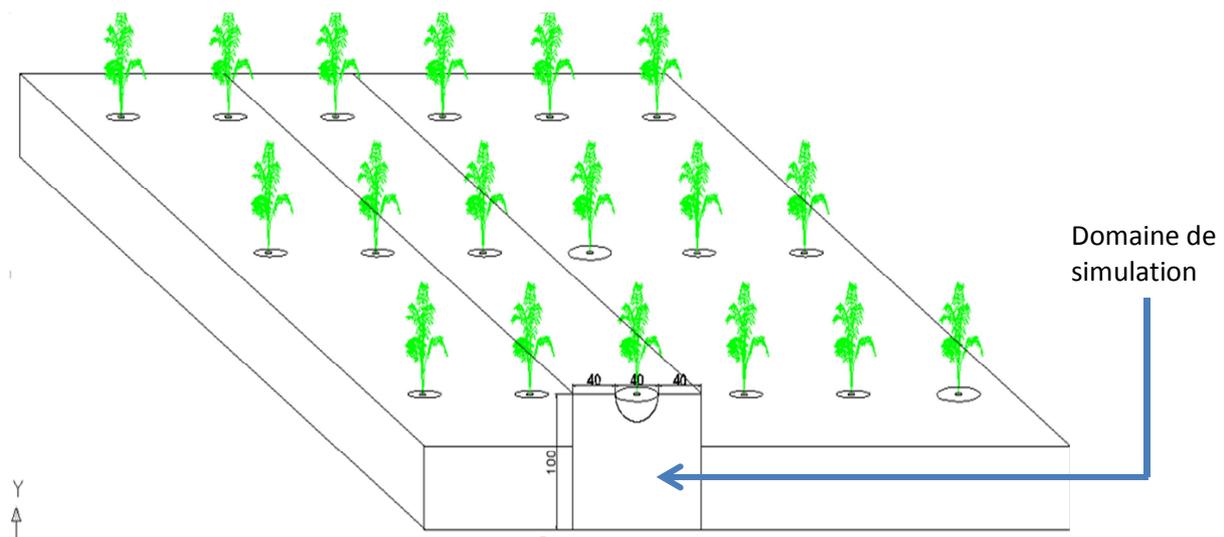
**Tableau 3:** Paramètres de Feddes pour la courbe d'extraction racinaire

Paramètres	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$h_3$ (cm)	$h_4$ (cm)	$r_T$ (cm.h <sup>-1</sup> )
Valeurs	-15	-30	-325 et -600	-8000	0,5 et 0,1

*Note :  $h_1$  = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est amorcée ;  $h_2$  = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est maximale ;  $h_3$  = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau amorce sa décroissance correspondant au taux de transpiration potentielle  $r_T$  ;  $h_4$  = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est nulle.*

**❖ Domaine de simulation, conditions initiales et aux limites**

Les dimensions de notre domaine de simulation ont été déterminées à partir d'un cas courant de disposition (en ligne) des trous de zaï. Dans cette disposition, les trous de zaï profonds de 0,2 m ont un diamètre de 0,4 m et écartés de 0,8 m. Ainsi, compte tenu de la symétrie de l'écoulement et de l'infiltration des flux sous les zaï, nous avons considéré comme domaine de simulation pour l'étude des flux d'eau, une surface qui comprend un poquet de zaï entier et la moitié de l'écartement entre les poquets voisins (Figure 7). La profondeur du domaine de simulation a été de 1 m prenant en compte la profondeur maximale d'enracinement du maïs.

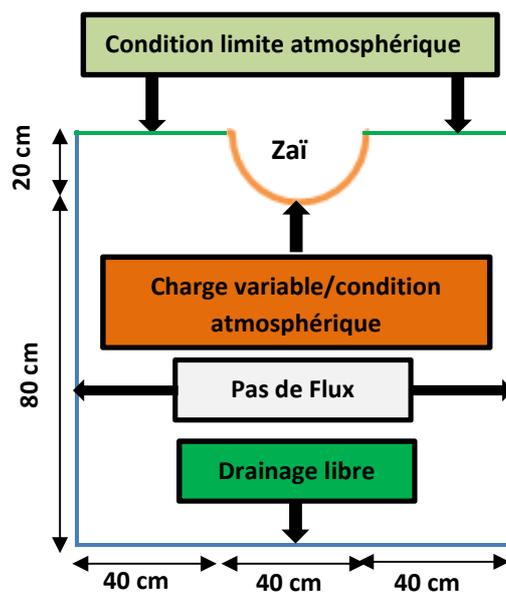


**Figure 7 :** Présentation du domaine de simulation

Sous HYDRUS, la condition initiale peut être spécifiée en termes de charge de pression ou de teneur en eau. Dans le cadre de cette étude, c'est la distribution de la teneur en eau obtenue le jour précédant qui a été considérée pour l'application de la condition initiale sous HYDRUS.

A cette condition initiale doivent être adjointes les conditions aux limites. Sous HYDRUS plusieurs conditions limites peuvent être appliquées selon les cas étudiés. Les conditions aux limites appliquées sur notre domaine de simulation sont résumées sur la Figure 8.

En effet, durant les événements pluvieux, les trous de *zai* sont remplis d'eau. Ce qui génère une charge de pression constante correspondant à la profondeur actuelle du *zai*. Cette lame d'eau a été supposée égale à 15 cm en moyenne dans notre étude. A la fin de la pluie et de l'infiltration de la lame d'eau, les frontières du *zai* ont été assimilées à une condition atmosphérique au même titre que la surface du sol. Quant aux frontières latérales du domaine de simulation, elles ont été assimilées à un flux nul.



**Figure 8 :** Conditions initiale et limite sur le domaine de simulation

### ***2.2.3. Détermination du temps de redistribution sous des scénarii de pluie***

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à déterminer par simulation à l'aide de HYDRUS 2D/3D la profondeur humidifiée sous le *zai* à la suite d'une pluie donnée et la durée du phénomène de transfert. Etant donné qu'à chaque événement pluvieux les conditions aux limites dans le *zai* vont dépendre de l'intensité de la pluie, nous avons défini des classes de pluies en fonction de leur durée sous d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, pour une pluie inférieure à 10 mm, les frontières du *zai* ont été assignées à une condition atmosphérique.

Pour des pluies supérieures à 10 mm, la charge constante suscitée de 15 cm a été appliquée à cette frontière et est fonction de la durée de la pluie. Tenant compte de la distribution temporelle des pluies collectées à partir d'une station météorologique installée sur le site, nous avons calé des temps moyens de séjour de l'eau dans le zaï de 30 min et 60 min. Ces temps de séjour correspondent respectivement à des pluies au moins égales à 10 mm mais inférieures à 20 mm d'une part et au moins supérieures à 20 mm d'autre part. Cette analyse de la redistribution de l'eau a été faite sur une décade correspondant approximativement au temps de stockage et de déstockage du sol.

### 2.3. . Analyse statistique des données

Les données de teneur en eau ont été traitées sous le tableur Excel en vue de générer des graphes. Des statistiques descriptives comme la moyenne et l'écart type ont été calculées afin de synthétiser les résultats et d'apprécier le degré de variation. Pour tester la signification des teneurs en eau et des stocks d'eau sous les deux techniques culturales, nous avons utilisé le test t de Student sous le logiciel MINITAB 14. Le seuil de 5% de probabilité a été retenu. Le choix porté sur ce texte paramétrique vient du fait que nos échantillons sont indépendants et aléatoires possédant une distribution normale. L'homocédasticité (égalité des variances) n'est pas contraignante puisque la taille des échantillons est de 68 supérieure à la valeur seuil de 30 recommandée. Ce test a été également utilisé pour analyser la signification des rendements en grain selon la pratique culturale.

Pour l'évaluation de la qualité des simulations réalisées, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination du modèle (CD) ont été utilisés. Les expressions mathématiques sont les suivantes (Mostofa Amin, 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i^{obs} - \theta_i^{sim})^2} \quad (13)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{obs} - \theta_{moy}^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{sim} - \theta_{moy}^{obs})^2} \quad (14)$$

où  $\theta_i^{obs}$  et  $\theta_i^{sim}$  sont respectivement les teneurs en eau observées et simulées et n est le nombre d'observations.

La prise de décision sur le degré de recouvrement des teneurs en eau observées et simulées est située idéalement à zéro pour RMSE et à 1 pour CD. Cependant, Moriasi et al. (2007) ont qualifié le RMSE d'indice erroné dans l'évaluation de la performance des modèles. Ainsi, pour atténuer ce risque, la RMSE standardisée (RSR) a été calculée d'après les

recommandations de Singh et al. (2004). L'expression proposée par Moriasi et al. (2007) s'écrit:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{obs} - \theta_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{obs} - \theta_{moy}^{obs})^2}} \quad (15)$$

Selon Moriasi et al. (2007), plus RSR est petite, plus la simulation est parfaite.

Cependant, étant donné que les niveaux de prise de décision ne sont pas exacts, un test de signification à 5% a été également fait pour analyser statistiquement la différence significative entre les teneurs en eau observées et simulées. Le test utilisé à cet effet est celui de Student.

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

La présentation des résultats est subdivisée en deux grandes parties. Une première partie qui expose les résultats humidimétriques obtenus in situ à travers notre dispositif expérimental. La deuxième partie analyse les perspectives de spatialisation des résultats expérimentaux grâce à la simulation des transferts d'eau sous le zai à l'aide du code HYDRUS-2D/3D.

#### 3.1. Contribution du zai à la constitution du stock d'eau du sol

L'analyse de la contribution de la technique du zai à la constitution du stock d'eau du sol a été abordée sous deux aspects : le profil humidimétrique et le stock d'eau dans la zone racinaire du maïs. Les profils hydriques obtenus sous le zai (Tz) ont été comparés à ceux établis dans le système de référence qu'est le labour + semis direct (To).

##### 3.1.1. Evolution temporelle de la teneur en eau du sol

L'humidimétrie des parcelles a montré une différence entre la dynamique de l'eau sous les deux pratiques culturales comme représentée sur la Figure 10 représentant l'évolution temporelle de la teneur en eau dans la zone (50 cm) densément colonisée par les racine de maïs.

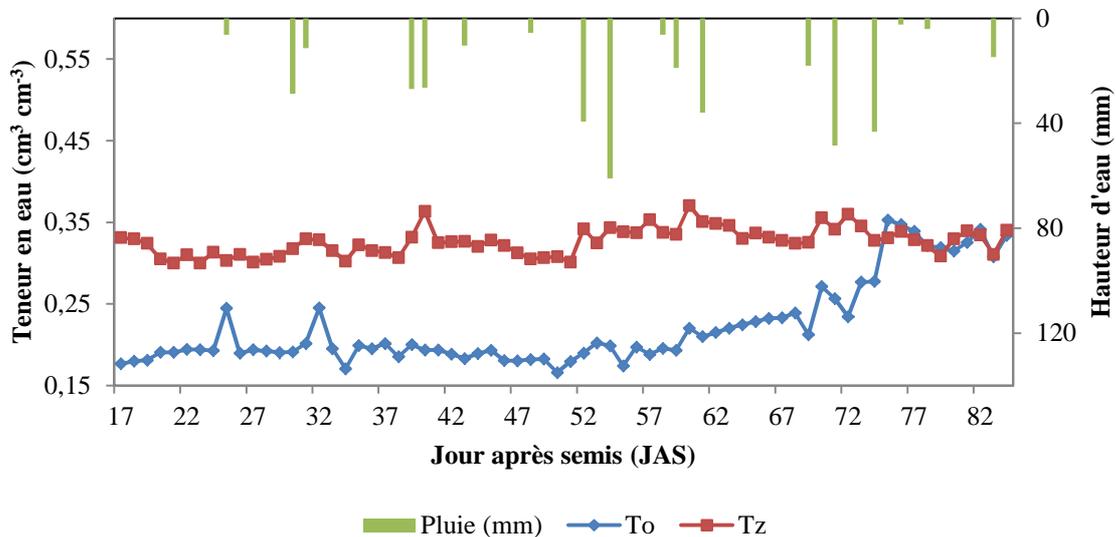
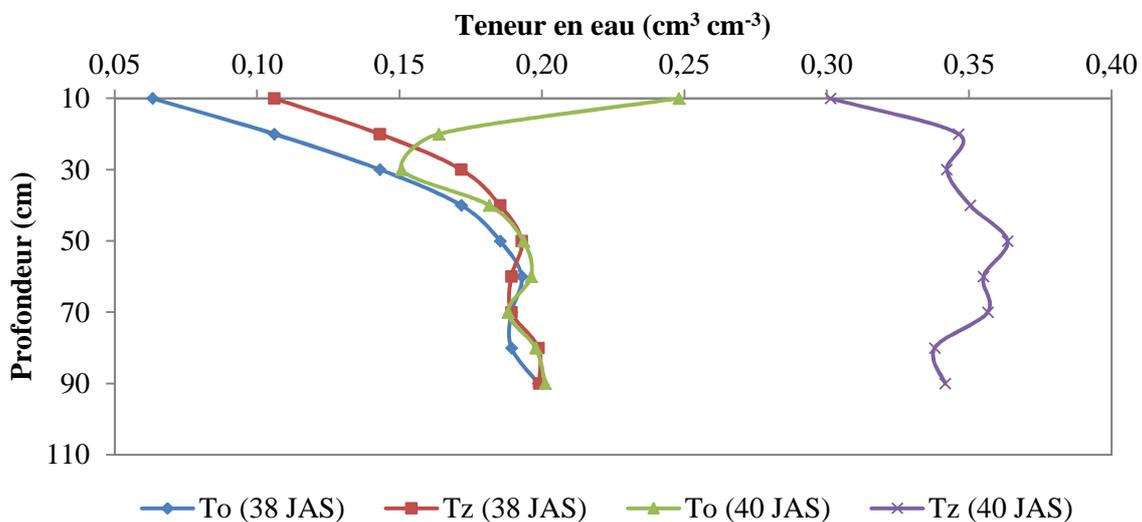


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau du sol à 50 cm de profondeur selon les pratiques culturales

La Figure 9 montre que les teneurs en eau ont été plus élevées sous le zai (Tz) que sous le labour + semis direct (To). La teneur en eau moyenne a été de  $0,22 \pm 0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  sous To contre  $0,33 \pm 0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  sous Tz soit une augmentation moyenne de 50 % par rapport au traitement témoin To. Il a fallu environ 75 jours après semis pour avoir un comportement hydrique semblable sous les deux pratiques culturales. Cette évolution différenciée de la

teneur en eau sous les deux pratiques culturales est hautement significative au seuil de 5% (p-value = 0,000).

La redistribution de l'eau suivant les profondeurs est plus lente sous To que sous Tz comme le montre les profils hydriques de la Figure 10. L'analyse de la Figure 10 montre une distribution profonde de l'eau sous le zaï puisque le profil hydrique établi le 40<sup>ème</sup> JAS montre des teneurs en eau variant de 0,30 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> en surface à 0,34 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> en profondeur significativement différentes de celles obtenues le 38<sup>ème</sup> JAS. Ce profil hydrique établi sous To montre une diminution de la teneur en eau de 0,25 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> en surface à 0,15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> à 30 cm de profondeur avant d'épouser l'allure du profil établi deux jours plutôt (38 JAS). Ce qui montre que les événements pluvieux du 39<sup>ème</sup> JAS (27 mm) et du 40<sup>ème</sup> JAS (26,5 mm) n'ont affecté significativement que les 30 premiers centimètres de sol sous To alors que c'est tout le profil qui a été mis à contribution sous Tz le 40<sup>ème</sup> JAS. Cette dynamique de l'eau dans les techniques culturales de zaï corrobore Somé et al. (2004). Ces auteurs ont rapporté qu'avec le zaï, la disparition de la croûte de battance des zipellés (terres dégradées en langue locale moré) favorise l'aération du sol et la rétention de l'eau dans les trous de zaï augmentant par surcroît l'humidité du sol.

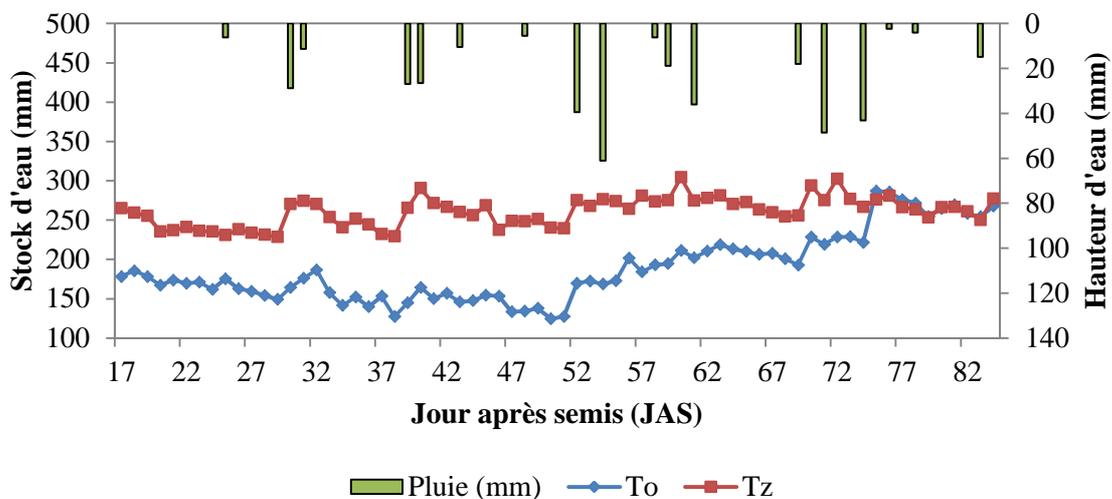


**Figure 10** : Profils hydriques au 38<sup>ème</sup> et 40<sup>ème</sup> jour après semis sous les deux pratiques culturales

### 3.1.2. Evolution temporelle du stock d'eau du sol dans la zone racinaire du maïs

La Figure 11 montre la variation temporelle du stock d'eau du sol de la surface jusqu'à 80 cm de profondeur. Le stock d'eau dans la zone racinaire du maïs a varié de 125 à 287 mm pour une moyenne de 188 ± 48 mm sous To contre 229 à 304 mm pour une moyenne de 260 ± 18 mm sous Tz (coefficient de variation 7% environ). La distribution de l'eau sous To a été

très variable (écart type  $\sigma = 48$  mm) comparativement à celle obtenue sous Tz (écart type  $\sigma = 18$  mm). La contribution du *zai* à l'augmentation du stock d'eau a été de 52% environ. Ce qui montre une plus grande disponibilité d'eau pour la plante sous le *zai* (Tz) suite à l'accumulation d'eau dans les poquets comparativement à la technique de labour + semis direct (To) qui favorise plus le ruissellement. Cette différence dans l'augmentation du stock d'eau du sol est très significative au seuil de 5% (p-value = 0,000). Autrement dit, le *zai* contribue significativement à l'augmentation du stock d'eau du sol comparativement à la pratique culturale de semis direct.



**Figure 11:** Variation du stock d'eau à 80 cm de profondeur selon la pratique culturale

Cette efficacité du *zai* dans l'amélioration du stock d'eau du sol a été déjà rapportée par Roose et al. (1999), Ndah et al. (2014). Cette pratique culturale développée en Afrique subsaharienne plus précisément au Sahel a permis selon Tilman et al. (2002) de faire face au double challenge (augmentation de la production agricole et préservation des ressources naturelles) sur l'agriculture de conservation. Cette contribution à l'augmentation du stock d'eau du sol confirme la potentialité du *zai* à conserver l'eau à la parcelle, réhabiliter les sols et réduire par surcroît le ruissellement comme l'ont rapportés Kaboré et Reij (2004). Cette réduction du ruissellement favorise plus l'infiltration de l'eau sous le *zai*. Ce qui augmente la capacité de rétention en eau des sols et partant évite le stress hydrique des cultures durant les poches de sécheresse apparaissant pendant la saison agricole. Cette atténuation des effets des séquences sèches concordent les travaux de Roose et al. (1993) qui ont rapporté que le *zai* tamponne l'effet d'une sécheresse durant deux à trois semaines si la capacité de stockage en eau du sol est suffisante. Allant plus loin, Lahmar et Yacouba (2012) ont montré que les

cuvettes de *zai* préparées pendant la saison sèche, piègent les matières organiques, y compris les graines, et matières minérales mises en mouvement par le vent durant la saison des pluies. Les ressources organiques piégées stimulent l'activité biologique des micro-organismes (principalement les termites) qui créent une porosité facilitant l'infiltration de l'eau. Pendant la saison des pluies, les poquets interceptent et infiltrent les eaux de ruissellement tout en réduisant notablement l'érosion hydrique.

Par ailleurs, cette technologie a permis aux paysans sahéliens de cultiver leurs parcelles dégradées tout en réduisant l'agriculture expansive, donc assurer par surcroît la conservation des ressources ligneuses. Cependant, selon Reij (1983), Kaboré et Reij (2004) la maintenance de la technologie est très coûteuse en temps et en main-d'œuvre (300 homme-heure/hectare).

### **3.1.3. Rendement en grain du maïs selon les pratiques culturales**

Les conditions d'humidité dans les différentes parcelles ont affecté différemment la production en grain du maïs comme le montre le tableau 4.

**Tableau 4.** Rendement en grain du maïs et paramètres statistiques (kg.ha<sup>-1</sup>) selon les pratiques culturales

<b>Traitement</b>	<b>Rendement</b>	<b>Maximum</b>	<b>Minimum</b>	<b>Ecart type</b>
<b>To</b>	3600 <sup>b</sup>	3810	3430	268,7
<b>Tz</b>	4800 <sup>a</sup>	4940	4690	176,8

*NB : les chiffres portant des lettres différentes sont significativement différents au seuil de 5%*

L'analyse révèle que les rendements en grain varient selon la technique culturale. Pour la technique de *zai* (Tz), le rendement est plus élevé et significativement différent au seuil de 5 % à celui obtenu avec la pratique culturale To. Le gain de rendement a été de 1200 kg ha<sup>-1</sup>, gain relativement élevé qui est dû à l'action cumulée de la fumure de fond (matière organique) et du NPK et de l'urée appliqués. La production en grain du maïs moins variable sous Tz était en moyenne 33% supérieure à celle obtenue sous To. Cette importante contribution du *zai* à l'amélioration du rendement des céréales corrobore les travaux de bon nombre d'auteurs réalisés au Sahel. En effet, Roose et al. (1993) ont trouvé au Sahel Burkinabé qu'avec le *zai* seul, un gain moyen de 38 kg ha<sup>-1</sup> est obtenu pour le sorgho blanc (*Sorghum bicolor*) sur deux saisons agricoles contre respectivement 372 et 979 kg ha<sup>-1</sup> pour la combinaison *zai* + compost et *zai* + compost + fertilisant. Ces mêmes auteurs ont montré qu'avec la technique du *zai*, les rendements du sorgho sont multipliés par environ 1,6 en saison humide alors qu'en saison plus sèche ce coefficient passe à 2,5. D'après les études

menées par le Belemvire et al. (2008) au Burkina Faso, le gain en rendement des céréales est évalué à plus de 69% pour le *zai* simple et à 118% pour le *zai* +cordon pierreux. Ainsi, en améliorant les conditions de nutrition hydrique et minérale de la plante, le *zai* permet d'accroître la production de biomasse et le rendement en grain des céréales (Fatondji, 2002; Fatondji et al., 2006).

Sur la base d'une analyse de régression, Kaboré (2000) a trouvé dans la même zone agro-écologique que la pratique du *zai* a augmenté le rendement du sorgho grain de 310 kg ha<sup>-1</sup> comparativement à la technique de semis direct. Des essais similaires menés sur l'impact des trous de *zai* (dénomination Burkinabé) ou *Tassa* (dénomination Nigérienne) et l'incorporation de la fumure organique ont révélé au Niger et au Mali des augmentations du rendement sorgho grain jusqu'à 719 kg ha<sup>-1</sup> selon que l'année soit humide ou sèche (Wedum et al., 1996; Hassane et al., 2000). Dans le but de renforcer ces conclusions, Kaboré et Reij (2004) ont également rapporté l'amélioration significative de la production du sorgho dès l'origine de la mise en place de la technologie par le producteur Yacouba SAWADOGO dans les années 1980 au Sahel Burkinabé. Ces auteurs ont signifié qu'en année de faible pluie, le rendement du sorgho varie de 300 à 400 kg ha<sup>-1</sup> sous le *zai* et peut atteindre 1500 kg ha<sup>-1</sup> en année de bonne pluie. Cependant, il faut noter que cette augmentation significative du rendement est également due à l'action de la fumure organique déposée dans les trous de *zai*. En effet, selon Kaboré et Reij (2004), Lahmar et Yacouba (2012) la matière organique utilisée dans les trous de *zai* mis en place durant la saison sèche attire les termites. Ces dernières jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la structure du sol via le creusage de galeries. Aussi, selon les mêmes auteurs l'activité biologique des termites sur la matière organique permet de mettre à la disposition de la plante des nutriments facilement assimilables. Cette concentration en nutriments couplée au confort hydrique sous le *zai* permet une bonne émergence des jeunes plants à la levée (Roose et al., 1999). Ce qui explique la régénération spectaculaire de la végétation observée en zone sahélienne sous la pratique de *zai*.

Cependant, toutes les études montrent que le *zai* seul ne suffit pas à relever notablement la production. Selon Fatondji (2002), Dan Lamso (2002), l'apport de ressources organiques est primordial et la production du système augmente avec la qualité des ressources organiques apportées; le fumier arrivant en tête. En effet, le rendement grains de mil obtenu par Bouzou Moussa et Dan Lamso (2004) dans un traitement *zai* + pailles de mil est 1,5 fois plus élevé que celui obtenu par le seul traitement *zai* alors que le *zai* amendé avec un mélange de fumier et de la paille (*zai* amélioré) permet de multiplier par 2 ce rendement comparativement au *zai*

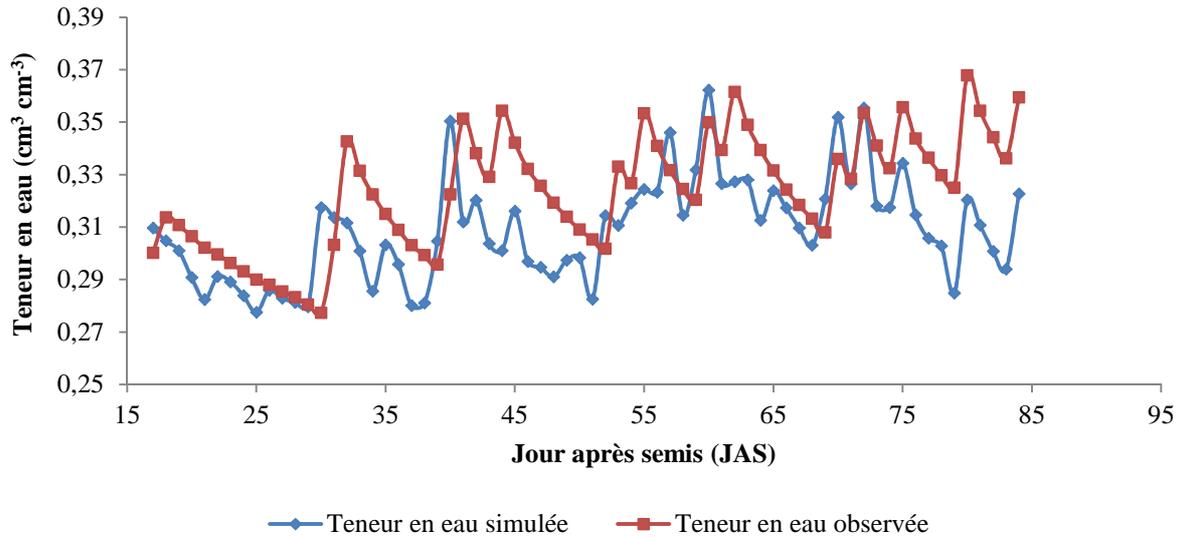
seul. Le "simple poquet", ne permettant qu'une faible augmentation des rendements par rapport au témoin, indique que l'amélioration des conditions d'alimentation hydrique des plantes reste insuffisante pour une augmentation significative des rendements, tant qu'on n'améliore pas le faible niveau initial de fertilité chimique des sols dégradés au Sahel Burkinabé localement appelés *zipellés* (Roose et al., 1995). L'augmentation spectaculaire des rendements par l'apport d'engrais minéral confirme non seulement que ces sols sont tous carencés en azote, phosphore et potassium, mais également que le poquet créerait des conditions permettant une valorisation effective de l'engrais minéral (maintien de l'humidité, développement du système racinaire, etc). Fatondji et al. (2006, 2009) ont montré que même en absence de termites, le *zai* améliore la décomposition des ressources organiques et la libération des nutriments. Ces auteurs ont également ajouté que l'efficacité agronomique et celle de l'utilisation des nutriments sont meilleures sous le *zai* comparativement au mode de culture traditionnel de semis direct.

### **3.2. Simulation des transferts d'eau sous le *zai***

Cette étude de simulation des transferts d'eau sous HYDRUS a été menée dans le but d'analyser l'impact de la variabilité de la pluie sur les potentialités du *zai* à améliorer le stock en eau du sol et le rendement des cultures céréalières. Cette étude tient sa raison d'être du fait qu'au Burkina Faso les études effectuées sur les potentialités du *zai* n'excèdent pas deux ans comme l'ont rapporté Kaboré et Reij (2004). Ce qui ne permet pas d'analyser à long terme et de façon adéquate l'impact de la variabilité des pluies sur les potentialités hydro-physiques et agronomiques de cette technologie.

#### **3.2.1. Evolution comparée de la teneur en eau mesurée et simulée**

Cette partie est importante dans le sens qu'elle a permis de mesurer le degré de fiabilité de notre modèle à reproduire la réalité. Ainsi, une comparaison graphique des teneurs en eau simulées et observées a été faite. Les résultats sont portés sur la Figure 12.



**Figure 12** : Evolution des teneurs en eau simulées et observées à 50 cm de profondeur

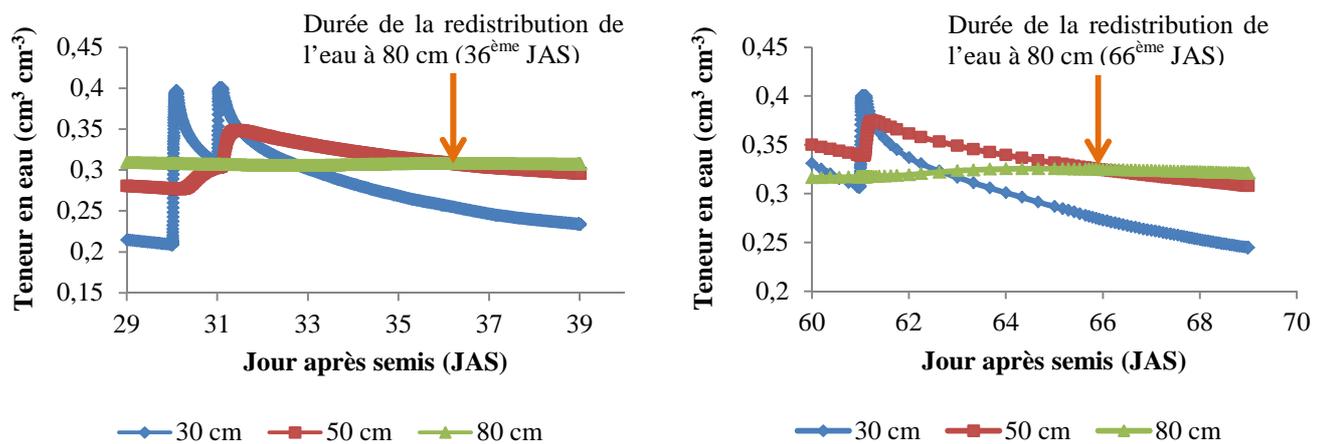
L'analyse de la Figure 12 a montré que les teneurs en eau simulées et mesurées ont été très peu différentes. Le sens de variation des teneurs en eau simulées et observées reste identique tout au long du cycle de développement du maïs. Les teneurs en eau simulées ont varié de 0,28 à 0,36  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  alors que celles observées ont varié entre 0,28 et 0,37  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . L'évaluation statistique a montré que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été estimée à 0,02  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  et sa valeur standardisée RSR était de 1,08. Ces valeurs relativement faibles et respectivement proches du seuil 0 et 1 permettent d'affirmer que notre modèle reproduit assez bien les transferts d'eau dans le sol d'étude. Cette fidélité du modèle à reproduire la réalité a été également confirmée par la valeur du coefficient de détermination du modèle estimé à 0,8. Le test de signification de Student a révélé qu'aucune différence significative n'a été observée à 5% entre les humidités simulées et celles observées ( $p$ -value = 0,000). Les écarts observés autour du 35<sup>ème</sup> et 45<sup>ème</sup> JAS sont dus à la discrétisation temporelle des événements pluvieux enregistrés autour de ces dates. En effet, la condition limite de pression de charge variable de 15 cm appliquée dans le zaï est intimement liée à l'intensité de la pluie, paramètre que nous n'avons pas pu mesurer in situ faute de matériel adéquat. Ainsi, les durées moyennes des classes de pluies retenues comme valeurs alternatives ne modélisent exactement point le comportement des événements pluvieux pour lesquels des temps de latence peuvent être observés durant son occurrence. Néanmoins, la similitude observée témoigne de la pertinence du calage réalisé sur la discrétisation temporelle des conditions aux limites du zaï en milieu réel. Cette efficacité de HYDRUS à reproduire les flux

d'eau dans les conditions d'un sol en milieu réel a été déjà observée par Mostofa Amin (2014) qui avaient trouvé une valeur du coefficient de détermination voisinant l'unité.

### 3.2.2. Redistribution de l'eau sous le zaï

L'étude de la redistribution de l'eau sous le zaï a été faite à trois profondeurs (30 cm, 50 cm et 80 cm) pour deux événements pluvieux (28,8 mm de pluie le 30<sup>ème</sup> JAS suivi de 11,3 mm le 31<sup>ème</sup> JAS puis 36 mm de pluie le 61<sup>ème</sup> JAS). Cette redistribution a été suivie depuis l'occurrence de l'évènement pluvieux jusqu'au prochain. Les résultats obtenus sont reportés sur la Figure 13.

L'analyse montre que pour une teneur en eau initiale de  $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , une hauteur de pluie de 28,8 mm provoque une augmentation de la teneur en eau jusqu'à  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  à 30 cm de profondeur environ 2 h après l'évènement. La réaction a été observée immédiatement à la profondeur de 50 cm alors que cette hauteur de pluie n'a point affectée la profondeur 80 cm. La pluie du 31<sup>ème</sup> JAS a le même effet sur la dynamique de l'eau ; saturation dans les 30 premiers centimètres du sol puis augmentation de la teneur en eau jusqu'à  $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  à 50 cm de profondeur. Pour une pluie de 36 mm enregistrée le 61<sup>ème</sup> JAS, le profil montre une augmentation de la teneur en eau jusqu'à 50 cm dans les heures qui suivent l'évènement. Il a fallu attendre 4 à 6 jours après pour une évolution semblable de la teneur en eau à 50 cm et 80 cm de profondeur. Ce qui sous-entend un faible drainage au-delà de 50 cm comme le montre la Figure 13.



**Figure 13** : Redistribution de l'eau sous le zaï après un cumul de pluie de 40 mm (à gauche) et 36 mm (à droite)

Au total, l'analyse a montré que la redistribution de l'eau sous le zaï peut prendre 6 jours sur les 100 premiers centimètres pour un sol cultivé en maïs. Ainsi, l'efficacité du zaï à endiguer

les effets d'une séquence sèche de 10 jours à l'intérieure d'une décade donnée va dépendre de la quantité de pluie que cette décade reçoit. Dans le cas d'un sol arable à texture sablo-limoneuse et une conductivité moyenne à saturation de  $11,8 \text{ cm j}^{-1}$ , cette pluie décadaire doit être au moins égale à 30 mm. Cette analyse de la redistribution de l'eau sous le *zai* confirme une fois encore que cette technique améliore le stockage de l'eau dans le sol et accroît sa disponibilité pour la plante (Fatondji, 2002) mais, sur les sols sableux, de faible capacité de rétention, la majorité de cette eau peut être perdue par drainage profond.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

La présente étude a porté sur les transferts d'eau sous les techniques de réhabilitation des sols dégradés au Sahel Burkinabè. Pour atteindre les objectifs et hypothèses assignés par cette étude, une analyse des transferts d'eau sous la technique de *zai* a été effectuée sur la base des données collectées dans le cadre du projet « Irrigation de Complément et Information Climatique » durant la campagne agricole de 2014-2015 dans le Sahel Burkinabé, notamment dans la commune de Kongoussi. Une simulation des transferts d'eau a été également faite à l'aide de HYDRUS-2D/3D pour valider l'étude expérimentale et étudier la redistribution de l'eau sous le *zai*.

Les résultats humidimétriques obtenus in situ à travers notre dispositif expérimental ont montré qu'une différence significative a été observée entre l'humidité du sol sous la technique du *zai* et l'humidité dans les parcelles témoin (semis direct). Le stock d'eau dans la zone racinaire du maïs a varié de 125 à 287 mm pour une moyenne de  $188 \pm 48$  mm sous To contre 229 à 304 mm pour une moyenne de  $260 \pm 18$  mm sous Tz (coefficient de variation 7% environ). Sous le *zai*, le gain de rendement a été de  $1200 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Les résultats de simulation sous HYDRUS-2D/3D ont montré qu'aucune différence significative n'a été observée entre la teneur en eau observée et la teneur en eau simulée. Ce qui a permis de monter avec ce modèle que sous le *zai*, une pluie de 30 mm au moins affecte tout le profil de 100 cm 5 à 6 jours après son occurrence.

En perspectives, nous suggérons que d'autres études soient réalisées afin d'affiner la contribution du *zai* à l'amélioration du stock d'eau du sol et son impact sur la dynamique de la nappe sous-jacente. Ces études peuvent utiliser la voie de la modélisation numérique, par exemple sous HYDRUS pour valider les potentialités du *zai* dans la lutte contre la dégradation des terres au Sahel Burkinabè et la sécheresse édaphique. En outre, dans des études ultérieures une cartographie des performances hydriques de la technique du *zai* selon les faciès pédologiques peut être réalisée afin qu'elle serve d'outil d'aide à la gestion de la campagne agricole dans les zones où la technique a été adoptée à grande échelle pour endiguer les problèmes de stress hydrique des cultures. Les simulations des transferts d'eau sous HYDRUS-2D/3D en fonction des faciès pédologiques permettront ainsi d'étudier la sensibilité du modèle à reproduire la réalité.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Ambouta, J.M.K., Valentin, C., Laverdiere, M.R., 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, Paris, n°7 : 269-275.
- Arbat, G., Rosello, A., Domingo, Olive, F., Puig-Bargues, J., Gonzalez Llinas, E., Duran-Ros, M., Pujol, J., Ramirez de Cartagena, F., 2013. Soil water and nitrate distribution under drip irrigated corn receiving pig slurry. *Agric. Water Manag.* 120: 11– 22.
- Bastet, G., Bruand, A., Quéting, P., Cousin, I., 1998. "Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): Une analyse bibliographique". *Etude et Gestion des Sols*, 5(1): 7-28.
- Belemvire, A., Maiga, A., Sawadogo, H., Savadogo, M., Ouedraogo, S., 2008. Evaluation des impacts biophysiques et socioéconomiques des investissements dans les actions de gestion des ressources naturelles au nord du plateau central du Burkina Faso. Rapport CILSS. 94p. <http://www.cilss.bf/IMG/pdf/etudesahelrapportBF.pdf>
- Bouzou-Moussa, I., Dan Lamso, N., 2004 - Le « tassa » : une technique de conservation des eaux et des sols bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glaciaires des régions semi-arides (Niger). *Revue de géographie alpine*, 92 : 61-70.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27p.
- Calvet, R., 2003. Le sol. Propriétés et fonctions : Phénomènes physiques et chimiques. Applications agronomiques et environnementales. Edition France Agricole.
- Coquet, Y., Desbourdes-Coutadeur, C., Vachier, P., Simunek J., Roger-Estrade, J., 2004. Influence de la variabilité spatiale de la structure des sols cultivés sur les transferts de l'eau et de l'ion bromure, *Etude et Gestion des Sols* 11 (1): 81 -92.
- Dan Lamso, N., 2002 -Valorisation des eaux de ruissellement en zones arides et semi arides méditerranéennes et sahéliennes par les techniques traditionnelles d'aménagement des sols. Thèse 3e cycle : Université Abdou Moumouni de Niamey et Université de Tunis II. 278 p.
- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon - Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de toile et de bitume. Par Henry Darcy, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées. Victor Dalmont, Éd., Paris.

- Diouf, M., Nonguierma, A., Abou, A., Royer, A., Somé, B., 2000. Lutte contre la sécheresse au Sahel: résultats, acquis et perspectives au Centre régional AGRHYMET, Sécheresse, 11(4): 257-266.
- Doto, C.V., Yacouba, H., Niang, D., Lahmar, R., Agbossou, K.E., 2015. Mitigation effect of dry spells in Sahelian rainfed agriculture: case study of supplemental irrigation in Burkina Faso. *Afr. J. Agric. Res.* 10(16): 1863-1873.
- Douzals, J.P., 2000. Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision. *Ingénieries- E A T*: 45-52. <hal-00464489>. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00464489/document>.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.* 32(9): 211-223.
- Ellis-Jones, J., Tengberg, A., 2000. The impact of indigenous soil and water conservation practices on soil productivity: examples from Kenya, Tanzania and Uganda. *Land Degrad. Develop.* 11: 19–36.
- Fatondji, D., 2002 - Organic amendment decomposition, nutrient release and nutrient uptake by millet (*Pennisetum glaucum* L. R. Br) in a traditional land rehabilitation technique (zai) in the Sahel. PhD thesis, University of Bonn, Germany. 140 p.
- Fatondji, D., Martius, C., Biolders, C.L., Vlek, P.L.G., Bationo A., Gerard B., 2006. -Effect of planting technique and amendment type on pearl millet yield, nutrient uptake, and water use on degraded land in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76 : 203–217
- Fatondji, D., Martius, C., Zougmore, R., Vlek, P.L.G., Biolders C.L., Koala S., 2009 - Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 85 : 225–239.
- Feller, C., Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons, New York.
- Hassane, A., Kuper, M., Orange, D., 2000. Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali. *Sud Sci. Tech.*, 5: 16-31.
- Hauchart, V., 2007. Durabilité de l'agriculture en fonction des pratiques culturales actuelles et conseillées (Burkina Faso et Nord Ghana). Volta Basin Focal Project Report No 2. IRD, Montpellier, France, and CPWF, Colombo, Sri Lanka, 109 p.
- INERA, 1994. Les systèmes de production dans la zone Ouest du Burkina Faso: potentialités, contraintes, bilan et perspectives de recherche, Ouagadougou, p48.

- Kaboré, D., 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. <http://www.ifpri.org/divs/eptd/dp/papers/eptdp114.pdf>.
- Kaboré, P.D., 2000. Performance des technologies de conservation des eaux et du sol en champs paysans à Donsin, Burkina Faso. Annales de l'Université de Ouagadougou, Série, 13.
- Kayombo, B., Hatibu, N., Mahoo, H.F., 2004. Effect of micro-catchment in rainwater harvesting on yield of maize in a semi-arid area. In: 13<sup>th</sup> International Soil Conservation Organisation Conference. Conserving Soil and Water for Society, Sharing Solutions, Brisbane, July 2004. <http://www.tucson.ars.ag.gov/isco/isco13/PAPERS%20F-L/KAYOMBO.pdf> (online).
- Kosugi, K., 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resour. Res. 32(9): 2697-2703.
- Lahmar, R., Yacouba, H., 2012. Zaï et potentiel de l'association cultures annuelles arbustes natifs In: La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux [en ligne]. Montpellier: IRD Éditions (généré le 21 mars 2015). Disponible sur Internet: <http://books.openedition.org/irdeditions/3298>
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., Walser, S., Schütze, N., Dejean, C., 2011. Analysis of AET and yield predictions under surface and buried drip irrigation systems using the Crop Model PILOTE and Hydrus-2D. Agric. Water Manag. 98: 1033–1044.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50 (3): 885-900.
- Mostofa Amin, M.G., Šimůnek, J., Lægdsmand, M., 2014. Simulation of the redistribution and fate of contaminants from soil-injected animal Slurry. Agric. Water Manag. 131: 17-29.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12(3):513-522.
- Mutekwa, V., Kusangaya, S., 2006. Contribution of rainwater harvesting technologies to rural livelihoods in Zimbabwe: the case of Ngundu ward in Chivi District. Water SA 32 (3): 37–444.

- Ndah, H.T., 2014. Adoption and adaptation of innovations (Doctoral dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät). 143p.
- Niang, D., Mermoud, A., Yacouba, H., Ribolzi, O., 2012. Temporal evolution of the Hydrodynamic behaviour of sandy deposits in the Sahelian part of Burkina Faso. *J. Soil Sci. Environ. Manag.* 3(12): 297-307. <http://dx.doi.org/10.5897/JSSEM11.156>
- Nicou, R., Chopart, J.L., 1995. Travail du sol et propriétés physiques du sol en zone semi-aride ouest-africaine. En ligne à l'adresse <http://anafide.org/doc/HTE%2086/86-7.pdf>.
- Ouédraogo, E., Brussaard, L., Stroosnijder, L., 2007. Soil macrofauna and organic amendment interactions affects soil carbon and crop performance in semi-arid West Africa. *Biol. Fert. Soils*, 44(2): 343-351.
- Ouédraogo, M., Kaboré, V., 1996. Le zaï, technique traditionnelle de réhabilitation des terres dégradées au Yatenga (Burkina Faso). In : Reij C, Scoones I, Toulmin C, eds. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*. Paris ; Amsterdam ; Wageningen : Karthala ; CTA ; CDCS.
- Pala, M., Ryan, J., Zhang, H., Singh, M., Harris, H., 2007: Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agric. Water Manag.* 93: 136–144.
- Pretorius, E., Woyessa, Y.E., Slabbert, S.W., Tetsoane, S., 2005. Impact of rainwater harvesting on catchment hydrology: a case study of the Modder River basin, South Africa. *Trans. Ecol. Environ.* 80, 1–59.
- Ramos, T.B., Simunek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L., Pereira, L.S., 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *J. Hydrol.* 407: 129–144.
- Ramos, T.B., Simunek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Pereira, L.S., 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agric. Water Manag.* 111: 87– 104.
- Reij, C., 1983. L'évolution de la lutte anti-érosive en Haute Volta depuis l'indépendance: vers une plus grande participation de la population. Vrije Universiteit. Amsterdam : Amsterdam Institute for Environmental Studies.
- Reij, C., Scoones, I., Toulmin, C., 1996. *Sustaining the soil: indigenous soil and water conservation in Africa*. London : Earthscan.

- Roberts T., Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Thompson, T.L., 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 233–240.
- Roberts, T., White, S.A., Warrick, A.W., Thompson, T.L., 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agric. Water Manag.* 95: 669–677.
- Rockström, J., Folke, C., Gordon, L., Hatibu, N., Jewitt, G., Penning de Vries, F., Rwehumbiza, F., Sally, H., Savenije, H., Schulze, R., 2004. A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through Water System Innovations: an integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Phys. Chem. Earth* 29: 1109–1118.
- Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S.P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., Qiang, Z., 2010. Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agric. Water Manag.* 97: 543–550.
- Roose, E., Kaboré, V., Guenat, C., 1993. Le zaï: Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. Orstom ser. Pedol.*, 28 :159-73.
- Roose, E., Kabore, V., Guenat, C., 1995. Le zaï: fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahier ORSTOM Pédologie*. In spéciale érosion: réhabilitation des sols et GCES: 158-173.
- Roose, E., Kabore, V., Guenat, C., 1999. Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Res. Rehabil.* 13(4): 343–355.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfert functions. *J. Hydrol.* 251: 163-176.
- Servat, T.E., Paturol, J.E., Lubes, H., Kouame, B., Ouedraogo, M., Masson, J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* 191(1-4): 1-15. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03068-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03068-5)

- Shortt, J.W., Capaldi, D.M., Kim, H.K., Kerr, D.C.R., Owen, L.D., Feingold, A., 2012. Stability of intimate partner violence by men across 12 years in young adulthood: Effects of relationship transitions. *Prev Sci.* 13(4): 360–369. doi: 10.1007/s11121-011-0202-0
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2012. The HYDRUS Software Package for Simulating the two-and three-Dimensional Movement of Water Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical manual Version 2.0. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. California. p.260. <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?downloads>
- Singh, A.K., Kumar, A., Singh, K.D., 1998. Impact of rain water harvesting and recycling on crop Productivity in semi-arid areas—a review. *Agric. Rev.* 19, 6–10.
- Singh, J., Knapp, V.H., Demissie, M., 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT.ISWSCR2004-08. Champaign, III: Illinois State Water Survey.
- Siyal, A.A., Bristow, K.L., Simunek, J., 2012. Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies, *Agric. Water Manag.* 115: 242– 251.
- Siyal, A.A., Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *Agric. Water Manag.* 96 (6): 893–904.
- Siyal, A.A., van Genuchten, M.Th., Skaggs, T.H., 2009. Performance of pitcher irrigation systems. *Soil Science* 174 (6): 312–320.
- Somé, D., Zombré, P.N., Zombré, G., Macauley, H.R., 2004. Impact de la technique du zai sur la production du niébé et sur l'évolution des caractéristiques chimiques des sols très dégradés (zipellés) du Burkina Faso. *Sécheresse* 15 (3): 263-269.
- Tabor, J. A., 1995. Improving crop yields in the Sahel by means of water-harvesting. *J. Arid Environ.* 30: 83–106.
- Tafteh, A., Sepaskhah, A.R., 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agric. Water Manag.* 113: 19– 29.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418 : 671-677. <http://www.nature.com/nature/journal/v418/n6898/pdf/nature01014.pdf>
- van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.

- Vogel, T., Císlarová, M., 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, *Transport in Porous Media*, 3: 1-15.
- Wakindiki, I.I.C., Ben-Hur, M., 2004. Indigenous soil and water conservation techniques: effects on runoff, erosion, and crop yields under semi-arid conditions. *Aust. J. Soil Res.* 40: 367–379.
- Wedum, J., Doumbia, Y., Sanogo, B., Dicko, G., Cissé, O., 1996. Rehabilitating Degraded Land: Zaï in the Djenné Circle of Mali, Chapter 7 in Reij, C., Scoones, I., Toulmin, C., (eds). *Sustaining the Soil: Indigenous Soil and Water Conservation in Africa*. Earthscan, London.
- Wisseling, J.G., Elbers, J.A., Kabat, P., van den Broek, B.J., 1991. SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, Netherlands.
- Woldearegay, K., 2002. Surface water harvesting and groundwater recharge with implications to conjunctive water resource management in arid to semi-arid environments (with a model site of the Mekelle area, northern Ethiopia). Addis Ababa, Ethiopia.
- Zougmoré, R., Zida, Z., Kambou, N.F., 2003 - Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil Till. Res.*, 71 : 143 – 149.