



**IMPACTS DES PRATIQUES CULTURALES SUR LE BILAN
HYDRIQUE, LA CROISSANCE DES PLANTES ET LE
RENDEMENT AGRICOLE :
CAS DU BASSIN VERSANT DE TOUGOU AU BURKINA FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques /Eaux Agricoles**

Présenté et soutenu publiquement le 26 juin 2018 par

Hayath Manou ZIME YERIMA

Travaux dirigés par :

Dr. Dial NIANG, Enseignant-chercheur, LEHSA, 2iE

M. Cheick Oumar ZOURE, Doctorant, LEHSA, 2iE

M. Roland O YONABA, Doctorant, LEHSA, 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr Malicki ZOROM**

Membres et correcteurs : **Dr FOWE TAZEN**

M. Boureima KOUANDA

M. Cheick Oumar ZOURE

Promotion [2016/2017]

CITATION

Rien n'est meilleur que l'agriculture, rien n'est plus beau, n'est plus digne d'un homme libre. Elle suffit amplement aux besoins de notre vie.

Damase Potvin

AVANT-PROPOS

L'objectif du programme 3^E (Eau - Environnement- Energie) est la coopération scientifique pour le développement entre le 2iE et des institutions universitaires et de recherche suisses (EPFL, EAWAG, HEIG-VD) permettant de renforcer leurs capacités dans les domaines prioritaires pour l'Afrique que sont l'eau potable, l'assainissement, l'environnement et les énergies renouvelables afin d'accroître le capital humain et les capacités d'innovation en Afrique pour répondre aux défis du développement du continent . Le programme 3^E est financé par la Direction du Développement et de la Coopération Suisse (DDC) et a une durée de 9 ans. Notre étude s'inscrit dans la composante 1 de ce programme qui est consacrée à la recherche scientifique et technologique. Elle porte sur le volet cycle de l'eau et a pour objectif de:

- ✓ Quantifier l'impact des aménagements et pratiques culturelles sur le bilan hydrologique à l'échelle de la parcelle et du bassin versant ;
- ✓ Comprendre et modéliser les échanges Eaux de surface – Eaux souterraines dans le bassin versant

Le présent mémoire est en rapport avec la thèse de M. ZOURE Cheick Omar qui s'intitule **“impacts des techniques culturelles sur le fonctionnement des hydrosystèmes dans le bassin versant de Tougou (Burkina Faso)”**. L'Afrique subsaharienne est en effet confrontée depuis quelques années à une fluctuation des conditions climatiques qui se manifeste par une baisse et une irrégularité des pluies, une augmentation des poches de sécheresse conduisant à la baisse de la production agricole. Face à cette difficulté, les populations ont développé des stratégies d'adaptation. Il s'agit des techniques de conservation des eaux et des sols et de construction de petites retenues d'eau. La thèse de M. ZOURE vise l'évaluation des performances hydriques de pratiques culturelles adoptées dans le sahel.

DEDICACES

Je dédie ce travail,

- ✓ A ma très chère mère CHABI TALATA Mariam, incarnation du courage, du travail et de la persévérance, vous êtes ma force. Trouvez ici toute ma gratitude.
- ✓ A mon père très cher père ZIME YERIMA Ali, nul mot ne saurait traduire l'affection que je vous porte.
- ✓ A tous mes oncles et tantes pour leur soutien et leurs conseils.
- ✓ A mes frères, mes sœurs, mes cousins et cousines qui m'ont toujours épaulé et réconforté, que l'affection et l'attachement qu'on se porte nous unissent à jamais.

A tous je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Je voudrais rendre grâce à Allah le Seigneur des mondes, le Tout miséricordieux, le Très miséricordieux par qui tout est possible. Ce travail est le résultat de la contribution de plusieurs personnes à qui j'adresse mes sincères remerciements.

Tout d'abord mes remerciements vont à l'endroit de mes encadreurs, Dr Dial NIANG, M. ZOURE Cheick Oumar et M. Roland YONABA. Ces derniers n'ont ménagé aucun effort pour la réalisation de ce travail. Veuillez accepter mes remerciements pour tous vos conseils, vos critiques, vos orientations et votre soutien. Je vous exprime ma gratitude.

Je remercie tout le corps professoral et le personnel administratif de 2iE pour la connaissance transmise.

Mes remerciements vont également à ceux qui nous ont assistés au cours de ce travail :

- ✓ Pr. Harouna KARAMBIRI
- ✓ Dr. Mahamadou KOITA
- ✓ Dr. FOWE TAZEN
- ✓ Dr. Lawani MOUNIROU
- ✓ M Mathieu KABORE
- ✓ Me Radegonde RUSAGARA

Mes camarades, Dorcas ILBOUDO, Rodrigue MOUMOULA, Kader ISSOUFOU, Balkissa SAWADOGO pour l'ambiance fraternelle.

Une pensée spéciale à Mlle Danièle SEGBO, pour l'encouragement et le soutien.

Une pensée à tous les stagiaires de Tougou 2017, mes camarades promotionnaires et toute la famille estudiantine du 2iE.

Mes sincères remerciements aux parents, amis et tous ceux qui de près ou de loin m'ont assisté au cours de ces années d'apprentissage.

Puisse ce modeste travail être aussi l'expression de notre hommage à KARIMOU SABTI Abdoul- Razak, promotionnaire qui s'en est allé si tôt.

RESUME

Le bassin versant de Tougou au nord du Burkina Faso fait face à une dégradation des sols qui engendre une baisse des rendements agricoles. En guise d'adaptation, les populations ont adopté les pratiques culturales telles que le zaï, le cordon pierreux et la demi-lune. Ces techniques dites de conservation des eaux et des sols favorisent une meilleure gestion du ruissellement tout en luttant contre les effets de l'érosion. La présente étude, conduite dans ce bassin versant, évalue les performances hydriques et agronomiques des pratiques culturales. Un dispositif expérimental composé de deux blocs, dont chacun dispose 4 parcelles de 200 m² aménagées avec des pratiques culturales différentes (zaï, demi-lune, cordons pierreux et semis direct comme témoin), installé sur un sol encroûté (croûte d'érosion) a permis la quantification des composantes du bilan hydrique, la mesure de la croissance des plants et l'estimation des rendements agricoles durant la campagne hivernale 2017. Le matériel végétal utilisé est le petit mil *Kipalla IKMP 5*. Les résultats montrent que, l'aménagement de cordon pierreux réduit le ruissellement de 30% ($\pm 5\%$) et celui du zaï de 60% ($\pm 15\%$). Le ruissellement est quasi-nul sur la parcelle de demi-lune. Cette dernière peut stocker quatre fois plus d'eau que le témoin. Le drainage est quasi-inexistant sur les différentes parcelles. Les résultats montrent que le déficit hydrique est plus important sur la parcelle témoin (102 mm) par rapport aux parcelles aménagées (60, 23 et 0 respectivement pour le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune) ce qui traduit la résistance des pratiques aux poches de sécheresse. Le zaï et la demi-lune se sont avérés efficaces à réduire le stress hydrique des cultures. De plus, les plantes sur ces deux pratiques présentent les hauteurs moyennes les plus élevées (environ 237 cm) avec une biomasse importante. La résultante de ces différents aspects est l'amélioration du rendement, six fois plus élevé que celui du témoin.

Mots clés

Pratiques culturales

Bilan hydrique

Croissance des plantes

Rendement agricole

Tougou

ABSTRACT

Tougou watershed located in northern Burkina Faso undergoes a continually degradation of the grounds which causes a decrease of the agricultural yields. In order to overcome farming practices such as zaï, the "stone line" and the "half-moon" can be used. These practices, known as water harvesting techniques, promote better management of runoff and at the same time reduce erosion effect. This study, conducted in this watershed aims to evaluate the hydraulic and agronomic performance of farming practices. An experimental design composed of two blocks, whose arranged 4 plots of 200 m², with different farming practices (zaï, half-moon, stony lines and direct sowing as a control), installed on an encrusted soil allowed the quantification of water balance components, plant growth and crop yields during the 2017 rainy season. The plant was *Kipalla IKMP 5* millet. The results reveal that stone lines reduces runoff of 30 % ($\pm 5\%$) and that of zaï 60% ($\pm 15\%$). Runoff is insignificant on the half-moon plot. This practice can store four times more water than the control. Drainage is almost non-existent on the different plots. Water deficit is most important in control plot (102 mm) compare to farming practices (60, 23 and 0 respectively for stone line, zaï and half-moon) which explain practices resistance against dry spell. Zaï and half-moon were found to be effective in reducing crop water stress. Plants in this two practices present high height (approximately 237 cm) and important biomass. Resulting this different aspects, is yield increasing, six times more than the control.

Keywords

Farming practices

Water balance

Plant growth

Agricultural yield

Tougou

LISTE DES ABREVIATIONS

AGRHYMET : Agriculture Hydrologie Météorologie

CILSS : Comité Inter-Etat de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

DDC : Direction du Développement et de la coopération (Suisse)

DGPSA : Direction Générale des Prévisions Statistiques Agricoles

FAO: Food and Agriculture organization

FIT: Front Intertropical

GIZ: Gesellschaft für International Zusammenarbeit

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

NPK : Azote Phosphate Potassium

PANA : Programme d'Action National d'Adaptation à la variabilité et aux changements climatiques

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

TABLES DES MATIERES

Citation	i
Avant-propos	ii
Dédicaces	iii
Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Liste des abreviations	vii
Tables des matières	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Liste des photos	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART.....	3
I. Contrainte de l'agriculture dans le contexte sahélien.....	3
1.1. Cadre climatique du sahel.....	3
1.2. Etat de l'encroûtement des sols dans le contexte sahélien.....	4
1.3. Conséquences sur la productivité hydrique et agricole.....	5
II. Historique et description des pratiques culturales	6
II.1 Définitions-origine	6
II.2 Description de quelques pratiques culturales.....	6
III. Performances agronomiques et hydriques des pratiques culturales	9
III.1 Performances agronomiques	9
III.2 Performances hydriques	12
IV. Limites des études sur les pratiques culturales	13

IV.1	Plus-value de l'étude	13
IV.2	Questions de recherche.....	13
V.	Définition des différents paramètres du bilan hydrique du sol.....	13
V.1	Précipitation	14
V.2	Ruissellement.....	14
V.3	Drainage	14
V.4	Variation de stock	15
V.5	Evapotranspiration réelle	15
V.6	Remontée capillaire.....	16
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES		17
I.	Présentation de la zone d'étude	17
I.1.	Contexte écologique.....	17
I.2	Contexte démographique et économique.....	20
II.	Dispositif expérimental et collecte des données	21
II.1	Choix des pratiques culturales	21
II.2	Dispositif expérimental.....	21
II.3	Itinéraires techniques	23
II.4	Collecte des données.....	24
III.	Evaluation Statistique des données.....	28
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION		30
I.	Impact des pratiques culturales sur les composantes du bilan hydrique	30
I.1.	Impact des pratiques culturales sur le ruissellement.....	30
I.2	Impact des pratiques sur l'évapotranspiration réelle et le stock d'eau du sol.....	33
I.3	Indicateurs de performance hydrique.....	35
I.4	Discussion	36
II.	Impact des pratiques culturales sur la conductivité hydraulique à saturation du sol.	37
II.1	Conductivité hydraulique	37

Effet des pratiques culturales sur le bilan hydrique, la croissance des plantes et le rendement agricole : cas du bassin versant de Tougou

II.2	Texture du sol en surface des pratiques	38
III.	Impact des pratiques culturales sur la productivite agricole et hydrique	39
III.1	Evolution en hauteur et les autres paramètres phénologiques des plants	39
III.2	Rendement grain	44
III.3	Rendement biomasse.....	45
III.4	Discussion	46
CONCLUSION		48
LIMITES ET RECOMMANDATIONS		49
BIBLIOGRAPHIE		50
ANNEXE		54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Rendements de quelques céréales	11
Tableau 2: Paramètres de Rosetta fonction de la granulométrie à 1 m de profondeur	26
Tableau 3: Variation du coefficient cultural du mil.....	28
Tableau 4: Résultat du test de Mann-Whitney sur les différentes parcelles de même nature	31
Tableau 5: Résultat du test de Fisher sur les différentes parcelles	31
Tableau 6: Résultat du test de Kruskal Wallis sur les coefficients de ruissellement	32
Tableau 7: Résultat du test de Mann-Whitney sur les coefficients de ruissellement.....	32
Tableau 8: Indicateurs de performance	35
Tableau 9: Durée et vitesse de croissance des phases.....	40
Tableau 10: Caractérisation des sigmoïdes de croissance	41
Tableau 11: Résultat du test de Kruskal Wallis sur les rendements	44
Tableau 12: Résultat du test de Mann-Whitney sur les rendements	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte représentant la ceinture sahélienne.....	3
Figure 2: Représentation du phénomène du bilan hydrique, (Niang, 2015)	14
Figure 3: Localisation du bassin de Tougou	17
Figure 4: Evolution de la pluviométrie entre 1961 et 2009 de la station de Ouahigouya (Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso).....	18
Figure 5: Vue en plan du site expérimental de Tougou	22
Figure 6: Calendrier des opérations culturales.....	24
Figure 7: Courbe d'infiltration.....	25
Figure 8: Boîte à moustache des coefficients de ruissellement.....	30
Figure 9: Seuils de pluies du ruissellement sur les différentes pratiques culturales	33
Figure 10: Evolution du stock d'eau sur les pratiques.....	34
Figure 11: Evolution de l'évapotranspiration	35
Figure 12: Variation des conductivités hydrauliques à saturation	37
Figure 13: Texture du sol à la surface des pratiques	38
Figure 14: Evolution en hauteur des plantes	39
Figure 15: Paramètres de la sigmoïde	42
Figure 16: Variation des autres paramètres de croissance	43
Figure 17: Boîte à moustache des rendements	44
Figure 18: Variation du rendement en biomasse.....	46

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Terres dégradées (Billaz, 2012)	5
Photo 2: Demi-lune, (Zougmore 2000)	7
Photo 3: Cordons pierreux, (Zougmore et al. 2000).....	7
Photo 4: Zaï, (Billaz, 2012)	8
Photo 5: Paillage avec tige de mil, (Ouedraogo, 2005).....	9
Photo 6: Bande enherbée, (Rabdo, 2007)	9
Photo 7: Double anneau de MÜNTZ	25
Photo 8: Partiteur et fût à l'exutoire d'une parcelle.....	26
Photo 9: Tensiomètre.....	27
Photo 10: Un tamarinier sur le bassin versant de Tougou.....	58
Photo 11: Un karité sur le bassin versant de Tougou	58
Photo 12: Une liane sur le bassin versant de Tougou.....	59

INTRODUCTION

Le monde connaît une évolution qui s'accompagne de changements touchant différents secteurs (agriculture, élevage, industrie, santé etc.). Aussi ces dernières décennies (1970, 1980, 1990...) ont été marquées dans le monde et particulièrement en Afrique dans le Sahel par l'émergence des problèmes écologiques comme les changements climatiques, la perte de la biodiversité, les menaces des polluants organiques persistants, la dégradation des terres. L'adoption, en mai 1992 de la Convention des Nations Unies sur les changements climatiques, marque la prise de conscience, par la communauté internationale, de l'ampleur du réchauffement de la terre et de ses répercussions sur la vie humaine, les activités économiques et l'environnement (PANA, 2007). Les ressources naturelles sont particulièrement affectées, en témoignent : la réduction significative de la couverture végétale avec une crise inédite du bois, la dégradation des sols avec la perte de leurs potentialités d'où la chute des rendements agricoles et enfin la diminution des ressources en eau avec l'assèchement et l'ensablement des cours d'eau (Sawadogo et al., 2008).

L'agriculture dans le sahel est essentiellement pluviale, par conséquent, dépendant des conditions pluviométriques. De ce fait, elle est l'un des secteurs les plus vulnérables. Le Burkina Faso comme la plupart des pays sahéliens n'est pas en marge des effets des changements climatiques et de la dégradation des sols. Dans ce pays, l'agriculture occupe une part très importante de l'économie avec une participation de l'ordre de 30% au produit intérieur brut (Banque Mondiale, 2016) . Cette agriculture connaît toutefois une baisse de production due aux aléas climatiques et à la dégradation des sols (action anthropique et variabilité climatique). En effet, les sols de ce pays sont en majorité caractérisés par une croûte superficielle très imperméable. Ceci engendre un ruissellement important aux exutoires des bassins versants sahéliens. La succession de plusieurs cycles de sécheresse a également entraîné la dégradation des sols avec pour corollaire une modification de la structure superficielle du sol à l'origine de la modification de la relation ruissellement-infiltration (Casenave, Valentin, 1989). Or c'est l'infiltration qui induit le stock d'eau dans le sol utilisé par la plante pour sa croissance. Ces sols se distinguent aussi par leur faible taux en matières organiques généralement moins de 1% (Pallo et al., 2009). La paupérisation des sols combinés à la pluviométrie erratique ont conduit les paysans à adopter des stratégies d'adaptation dont les plus répandues sont : l'adaptation variétale, l'utilisation des techniques de conservation des

eaux et des sols, la modification des dates de semis. Ces réponses varient selon les zones agroclimatiques. Les principaux déterminants de l'adoption des stratégies adaptatives sont les variables de perception, la main d'œuvre importante, le savoir-faire presque inexistant, le manque de financement ou l'insécurité financière (Ouédraogo et al., 2010).

Dès lors les différents gouvernements, les organisations et les institutions s'engagent à travers des choix politiques pour une meilleure production agricole. Les principales actions menées jusqu'ici ont consisté à la mise en place de quelques pratiques culturales à savoir : la demi-lune, le cordon pierreux, le zaï, la bande enherbée, le paillage... Ce sont des techniques de récupération des sols dégradés qui améliorent la fertilité du sol et augmentent son stock d'eau. Plusieurs auteurs ont mené des études sur ces techniques dites de conservation des eaux et des sols (Vlaar, 1992; Zougmore et al., 2000; Barbier et al., 2009). Ces différentes études se sont intéressées à l'amélioration de la productivité, à la rentabilité économique, à la nécessité de ces pratiques agricoles mais pas à leur productivité hydrique. C'est pour compléter ces recherches antérieures et combler le besoin ainsi mis en évidence que notre étude portant sur l'effet des pratiques culturales sur le bilan hydrique, la croissance des plantes et le rendement agricole est initiée. Elle a pour site d'investigation le bassin versant de Tougou au nord du Burkina Faso, dans la province de Yatenga et a pour objectif général, l'évaluation des performances hydriques de trois (3) pratiques culturales à savoir : la demi-lune, le cordon pierreux et le zaï.

Il s'agit spécifiquement dans le cadre de cette recherche de :

- ✓ Evaluer l'impact des pratiques culturales sur les composantes du bilan hydrique ;
- ✓ Evaluer l'impact des pratiques culturales sur la croissance des plantes ;
- ✓ Evaluer enfin l'impact des pratiques culturales sur le rendement agricole.

Le présent document est organisé en trois (3) parties. La première présente la synthèse des études antérieures menées sur le sujet d'étude. La seconde partie quant à elle présente les matériels et méthodes utilisés pour atteindre les objectifs visés dans le cadre de la recherche. La dernière partie présente les résultats et discussion de notre étude. Nous terminerons ce travail par une conclusion suivie de recommandations.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I. CONTRAINTE DE L'AGRICULTURE DANS LE CONTEXTE SAHELIEN

I.1. Cadre climatique du sahel

Etymologiquement, Sahel provient du mot arabe "sahil" qui signifie plaine, terrain plat ou terre plate. Les limites du sahel varient selon les conceptions des géographes. On peut le situer, entre les latitudes 14° et 18° Nord dans la partie occidentale de l'Afrique et entre les latitudes 12° et 16° Nord au Tchad (Diello, 2007). La ceinture sahélienne représentée sur la figure 1 recouvre entièrement ou en partie les pays suivants : l'Algérie, le Sénégal, la Mauritanie, le Mali, le Burkina Faso, le Tchad, le Soudan, le Cap vert. C'est une région où les populations sont confrontées depuis les années 1970 à une forte variabilité climatique (Albergel et al., 1984).



Figure 1: Carte représentant la ceinture sahélienne

Les pays du Sahel sont caractérisés par des précipitations faibles et irrégulières. La variabilité pluviométrique du Sahel est certainement le résultat d'interactions complexes entre plusieurs processus (Heinrigs, 2010). Le Burkina Faso, pays de notre étude, présente depuis 1970 une forte occurrence d'années sèches, 1972, 1985, 2005... (Albergel et al., 1984). Le climat du Sahel burkinabé se caractérise par une saison sèche (octobre-mai) et une saison des pluies (juin-septembre). La pluviosité de la zone sahélienne est caractérisée non seulement par une irrégularité des quantités tombées, mais aussi par une mauvaise répartition dans l'espace et dans le temps (Niang, 2006). Au Burkina Faso, les pluies annuelles varient entre 300 et 600 mm en zone sahélienne. Les cumuls annuels de pluie présentent une forte variabilité interannuelle avec une moyenne de 512 mm et un écart-type de 121 mm. Les valeurs minimales et maximales observées sont de 244 mm et 784 mm par rapport à la moyenne interannuelle (Karambiri, 2003).

Depuis les années 1970, le déficit pluviométrique annuel varie entre 10 et 40%, cela révèle l'ampleur de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau superficielle (Mounirou, 2012).

Un autre paramètre à prendre en compte est le vent. Les vitesses des vents sont relativement faibles (2 m/s) sauf en début et en fin de saison de pluies lors des manifestations pluvieuses et elles sont liées aux mouvements du FIT qui est la trace au sol matérialisée par une dépression intertropicale de l'intersection entre les masses d'air boréal, harmattan et austral, moussons (Wellens et al., 2003). Les températures connaissent aussi une forte variabilité spatio-temporelle. Les moyennes mensuelles dépassent rarement 35°C et les extrêmes se rencontrent au nord avec une valeur minimale absolue de 5°C et une valeur maximale absolue de 47,2°C. Pour les trois zones climatiques du pays, l'évolution de ces températures montre une légère tendance à la hausse comme l'atteste la situation à Ouagadougou (PANA, 2007).

Les pays du sahel font donc face à une variabilité climatique se caractérisant par la baisse des pluies et l'augmentation de la température. Outre les effets du climat, on note aussi les actions anthropiques telles que : la déforestation, un surpâturage, la monoculture intensive sans utilisation de fertilisants ni de matières organiques, les feux de brousses tardifs, etc. Ces fléaux ont gravement affecté l'équilibre écologique et engendré la dégradation des ressources naturelles du sol (Malam Abdou, 2014).

1.2. Etat de l'encroûtement des sols dans le contexte sahélien

Selon CASENAVE et VALENTIN un état de surface peut désigner une surface élémentaire, la juxtaposition de plusieurs ou un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble, au sein duquel jouent des interactions. La surface élémentaire est un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivant : le couvert végétal, la surface du sol, les organisations pédologiques superficielles. Le sol est dit dégradé lorsqu'une transformation de ses caractéristiques ne lui permet plus d'assurer ses fonctions de support et de nutrition pour les végétaux (Ouedraogo, 1999 ; Mando et al., 2000). Cette dégradation selon (Bousquet, 1997) est un processus complexe et le résultat de l'enchaînement dans le temps et dans l'espace de divers processus de détérioration.

Au Sahel, l'action conjuguée de l'homme et du climat ont accéléré la dégradation de l'environnement qui se traduit à terme par un encroûtement des sols (Mounirou, 2012). L'agressivité potentielle du climat sahélien reste, toutefois, d'un niveau suffisant pour engendrer la dégradation des sols par érosion hydrique ou éolienne sur les bassins. Elle se manifeste entre autres par la formation d'une croûte superficielle imperméable aux pluies, qui est attribuée à la baisse tendancielle des teneurs en matière organique des sols. Sous l'effet des pluies (effet splash) et vents, les particules se détachent et forment une croûte protégeant l'horizon superficiel induisant ainsi une faible infiltration et un fort ruissellement. Une étude (Leblanc et al., 2008) montre que 80% des sols sont dénudés entre 1950 et 1992 au sahel. L'image suivante présente un sol dénudé au sahel.



Photo 1: Terres dégradées (Billaz, 2012)

1.3. Conséquences sur la productivité hydrique et agricole

L'agriculture constitue la principale source de revenus pour 90% des actifs et procure plus de 50% des recettes d'exportation. D'une façon générale, le potentiel de rendement agricole au Sahel est très bas en raison des changements climatiques et de la dégradation des sols. Les conditions pédoclimatiques défavorables et les processus continus de dégradation des sols réduisent considérablement les rendements agricoles.

En effet, la baisse des précipitations réduit la disponibilité d'eau de surface et souterraine pour l'irrigation. L'accès aux eaux de surface pérennes est ainsi particulièrement fragilisé impactant sur les rendements agricoles. Aussi la hausse de la température favorise-t-elle l'accroissement de l'évapotranspiration entraînant ainsi une réduction de l'humidité du sol. Des études récentes du CILSS/Agrhymet (Sarr et al., 2011) ont montré que les rendements des cultures comme le mils/sorghos vont baisser de plus 10 % en cas d'augmentation des températures de + 2°C et de variations peu significatives des précipitations à l'horizon 2050. Une hausse de + 3 °C engendrera une baisse de rendements agricoles de l'ordre de 15 à 25 % (Hubert, 2009). A cela s'ajoute le phénomène de dégradation des sols qui hypothèque les

fonctions de production végétale, de siège d'activités biologiques ou de matières organiques, la capacité d'échange, la stabilité, la rétention en eau et en éléments nutritifs. Entre 1967 et 1998, on note une baisse de rendement de plus de 20% (Mohamed et al., 2002). Au Burkina, en 2004 et 2007, de graves sécheresses ont causé une baisse significative de la production agricole (Mohamed et al., 2002).

Face à ce problème, diverses solutions ont été expérimentées. On peut citer entre autres : l'irrigation, la modification des calendriers culturaux et l'adoption de pratiques culturelles appropriées. Notre étude a pour objet l'impact de ces pratiques culturelles sur le bilan hydrique et leurs effets connexes.

II. HISTORIQUE ET DESCRIPTION DES PRATIQUES CULTURALES

II.1 Définitions-origine

Les pratiques culturelles peuvent se définir comme l'ensemble des techniques utilisées par les cultivateurs lors de l'exploitation d'une parcelle pour l'amélioration de leur condition de vie. Ces pratiques peuvent être à effets bénéfiques et souhaitables sur les éléments de l'environnement, elles peuvent présenter des difficultés de réalisation à court terme et à grande échelle (Nguekam, 2010). Leur utilisation dépend de la variabilité écologique des zones et peut se faire en association afin de profiter des effets cumulés de chaque pratique (Ouédraogo et al., 2010). Elles améliorent les conditions écologiques par la protection des terres contre l'érosion et améliorent la fertilité des sols (Malam, 2014). Ces pratiques ont été initiées par les populations avec l'appui des structures étatiques pour lutter contre la sécheresse et la désertification à la suite de la grande sécheresse de 1973 à 1974 au sahel (Some, 2001). Parmi ces différentes pratiques, on peut citer : le zaï, le cordon pierreux, la demi-lune, le paillage, le labour, la bande enherbée...

II.2 Description de quelques pratiques culturelles

a. La demi-lune

La demi-lune présentée en photo 2 est une pratique nouvellement introduite au Burkina Faso selon certains auteurs (Zougmoré et al., 1999). Elle est adaptée aux zones sahéliennes et soudano-sahéliennes (Vlaar, 1992). C'est un ouvrage en terre compactée ou en pierres en forme de demi-cercle avec des ouvertures perpendiculaires au sens d'écoulement des eaux et une disposition en quinconce. La technique des demi-lunes vise à récupérer des terres dégradées,

dénudées et encroûtées à des fins agricoles, pastorales ou forestières. Les dimensions et les écartements conseillés dans l'aménagement en demi-lune sont généralement de 4 m de diamètre, 12 à 30 cm de profondeurs, 2 à 4 m d'écartement sur la même ligne et 4 m entre deux lignes voisines (Billaz, 2012; Sangaré, 2002).



Photo 2: Demi-lune, (Zougmore 2000)

b. Les cordons pierreux

Les cordons pierreux (Photo 3) sont des dispositifs antiérosifs constitués de blocs de moellons / cailloux. C'est une mesure permettant de lutter contre l'érosion hydrique en nappe causée par le ruissellement. Ils ralentissent le ruissellement et le répartissent mieux sur le terrain aménagé. La diminution de la vitesse d'écoulement favorise l'infiltration de l'eau et empêche ainsi la perte d'eaux pluviales (Zougmore, Zida, 2000). Ils sont construits en lignes le long d'une courbe de niveau après décapage de 10 à 15 cm de sol le long de la ligne. Les sommets des pierres atteignent une hauteur de 20-30 cm du sol. L'écartement entre les cordons pierreux est de 20 à 50 m suivant la pente du terrain. La largeur d'un cordon est d'environ 15-20 cm ; sa longueur varie entre 10-30 m (GIZ, 2012).



Photo 3: Cordons pierreux, (Zougmore et al. 2000)

c. Le zai

En langue Mooré, "zai" vient du mot "zaiégré" qui veut dire « se lever tôt et se hâter pour préparer sa terre ». C'est une pratique de culture traditionnelle réapparue au Yatenga dans les années 1980 à la suite des périodes de sécheresse connues dans l'ensemble du Sahel (Roose et al., 1993). Elle consiste à creuser de petits poquets ou poches d'eau perpendiculairement à la pente du terrain, tout en disposant en aval du trou la terre excavée (terre de déblai) constituant ainsi un ados permettant de capter les eaux de pluie. Ces poquets sont de 20 à 40 cm de diamètre, de 10 à 15 cm de profondeur et disposés en quinconce (Roose et al., 1993) comme le présente la photo suivante :



Photo 4: Zai, (Billaz, 2012)

d. Le paillage ou mulch

C'est une technique qui utilise l'herbe ou les résidus de récolte comme présenté en photo 5. L'herbe fauchée ou les tiges sont étalées sur les terres à récupérer ou à améliorer pendant la saison sèche. Ce qui permet de réduire l'impact des gouttes d'eau sur le sol, d'amoindrir le ruissellement, d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, de permettre le contrôle des mauvaises herbes et d'accroître l'activité des micro-organismes. Ces derniers vont favoriser la décomposition de la paille ou des tiges, contribuant ainsi à l'amélioration de la fertilité du sol de façon à stimuler l'activité des termites et induire un ameublissement du sol et une augmentation de sa porosité en vue d'une meilleure infiltration de (Ouedraogo, 2005).



Photo 5: Paillage avec tige de mil, (Ouedraogo, 2005)

e. Les bandes enherbées

Une bande enherbée (photo 6) est un couvert végétal multifonctionnel d'au moins cinq mètres de large composé d'une flore adaptée aux caractéristiques spatiales de la parcelle, à son environnement ainsi qu'aux exigences de l'exploitant. Elles sont établies le long des courbes de niveau dans les champs et perpendiculairement au sens des écoulements diffus et suivant des critères adéquats liés aux sols, aux pentes, à l'occupation du sol et aux pluies. Les bandes enherbées grandissent avec la sédimentation, ce qui maintient l'effet de rétention d'eau contrairement aux ouvrages mécaniques, cordons ou diguettes (GIZ, 2012). Elles améliorent l'infiltration des eaux de ruissellement grâce au système racinaire des graminées.



Photo 6: Bande enherbée, (Rabdo, 2007)

III. PERFORMANCES AGRONOMIQUES ET HYDRIQUES DES PRATIQUES CULTURALES

III.1 Performances agronomiques

Des expérimentations portant sur la croissance ou l'évaluation des rendements de cultures ont été menées sur différentes pratiques agricoles de culture des céréales. Les expérimentateurs ont axé leurs recherches sur le développement racinaire ou la croissance en hauteur (Doto, 2016) des céréales (Sawadogo et al., 2008). L'étude de Sawadogo a montré une

meilleure croissance en hauteur du sorgho avec le zaï par rapport à des parcelles témoins. La hauteur moyenne des plants atteignait 160 cm avec le zaï et 80 cm sur le témoin. De plus et il a été constaté un mauvais développement du sorgho dans les parcelles témoins. Les plants étaient desséchés et rabougris.

Le rendement est aussi un indicateur de performance agronomique. Le tableau suivant fait un résumé des rendements issus de quelques expérimentations de pratiques sur des céréales:

Tableau 1: Rendements de quelques céréales

Pratiques	Cultures	Amendements	Résultats grain	Résultats paille	Références
Zaï	Sorgho	Néant	94 à 200kg/ha/ témoin	512 à 1125kg/ha	(Sawadogo et al. 2008)
		10 t/ha de compost + 400 kg/ha de phosphate naturels	94 à 706kg/ha/ témoin	512 à 1921kg/ha	
Zaï	Mil	Néant	161 à 1084kg/ha	539 à 1170kg/ha	(Kambou, Zougmore, 1995)
Zaï	Sorgho	Néant	63 à 153kg/ha	857 à 1213kg/ha	(Roose et al., 1995)
Demi-lune	Sorgho	Compost	15 à 24 fois supérieur à celui de la demi-lune sans aucun apport	15 à 24 fois supérieur à celui de la demi-lune sans aucun apport	(Zougmore et al. 2000)
Demi-lune	Sorgho	Compost	5 fois plus que la demi-lune sans apport (1481kg/ha)	2 fois plus que la demi-lune sans apport (2638kg/ha)	(Sangaré, 2002)
		Fumier	6 fois plus que la demi-lune sans apport (1673kg/ha)	2 fois plus que la demi-lune sans apport (3034kg/ha)	
Cordons pierreux	Sorgho	Néant	+ 33% à 55%	Néant	(GIZ, 2012)
	Sorgho	2,5 t/ha /an de fumier	3 à 5 fois plus que le témoin	Néant	(Zougmore et al. 2000)

Ces différents résultats montrent l'amélioration du rendement par les pratiques de cordon pierreux, de zaï et de demi-lune par rapport au témoin. Ceci en raison de la nature des pratiques qui stockent l'eau et les restituent à la plante.

III.2 Performances hydriques

L'étude du bilan hydrique du sol intéresse un éventail de plus en plus large de disciplines scientifiques et techniques: science du sol, agronomie, gestion de l'eau, conseil à l'irrigation, télédétection "thermique" et modélisation du climat du globe (Legras et al., 2014) . Ce bilan est très important au niveau agronomique, car il évalue les variations des réserves d'eau disponibles dans le sol pour les plantes (Legras et al., 2014).

D'après les études de (Zougmore et al., 2014), la technique des cordons pierreux est particulièrement efficace en ce qui concerne la réduction du ruissellement et l'amélioration de l'infiltration. Le ruissellement sur un champ aménagé est réduit de 5% avec un écartement entre cordons pierreux de 50 m, 12% avec un écartement entre cordons pierreux de 33 m, et 23% avec un écartement entre cordons pierreux de 25 m, comparé à un champ non aménagé (Zougmore et al., 2000). Aussi, (Albergel, Diop, 2012) ont montré que l'écoulement dans les parcelles de cordons pierreux était un peu moins que celui dans les témoins. Leur impact sur le ruissellement augmente avec le temps en fonction du colmatage des interstices entre les pierres. Cité par (Hauchart, 2007), les études menées sur le Plateau mossi burkinabé et dans le pays Dogon au Mali, montrent que les cuvettes de zaï permettent de collecter 25 % des pluies qui ruissellent sur un impluvium (Zougmore et al., 1999) . En effet, le premier effet du zaï consiste à maîtriser le ruissellement de l'eau et son infiltration (Some et al., 2016). L'étude de (Zougmore et al., 1999) a montré que les demi-lunes présentaient une humidité moyenne supérieure à 150 g/kg tandis que dans les parcelles de zaï l'humidité moyenne est inférieure à 150 g/kg. Cela concorde avec l'étude de (Roose et al., 1995) qui a aussi montré que l'humidité est importante sur les demi-lunes que sur les zaï, elle peut atteindre 202 g/ kg.

IV. LIMITES DES ETUDES SUR LES PRATIQUES CULTURALES

IV.1 Plus-value de l'étude

Les études réalisées sur les pratiques culturales ont plus porté sur les rendements agricoles, la restauration des potentiels des sols dégradés et les revenus monétaires liés à l'adoption des techniques par les ménages. Peu d'études se sont intéressées à l'impact des pratiques sur l'humidité du sol et le ruissellement. Les effets de ces pratiques sur les différents paramètres du bilan hydrique, voire les variations de stock d'eau n'ont pas fait l'objet d'étude. Cette étude, menée en zone sahélienne du Burkina Faso se propose d'évaluer les performances hydriques des techniques de conservation des eaux et des sols dans le but de proposer des pratiques efficaces en réponse à la variabilité pluviométrique et la dégradation des sols.

IV.2 Questions de recherche

Pour mener à bien cette étude, il est indispensable d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- ✓ Existe-t-il une relation entre les performances agronomiques rapportées par la littérature et les performances hydriques générées par les pratiques culturales ?
- ✓ Quelles sont les causes de la performance hydrique des techniques de conservation des eaux et des sols ?

V. DEFINITION DES DIFFERENTS PARAMETRES DU BILAN HYDRIQUE DU SOL

Le bilan hydrique schématisé en figure 2 est la différence entre les apports et les pertes d'eau dans le sol. Plus précisément, il permet de déterminer les échanges entre l'atmosphère et le système sol- végétation. Il est déterminé par l'application du principe de conservation de l'eau contenue dans un certain volume de sol (Legras et al. 2014).

$$P + Rc = R + \Delta S + Dr + ETR \quad (\text{Equation 1})$$

P : Précipitations ; ETR : Evapotranspiration réelle ; R : Ruissellement ; ΔS : Variation de stock ; Dr : Drainage ; Rc : Remontées capillaires.

L'ensemble des paramètres sont exprimés en mm d'eau reçue entre deux dates.

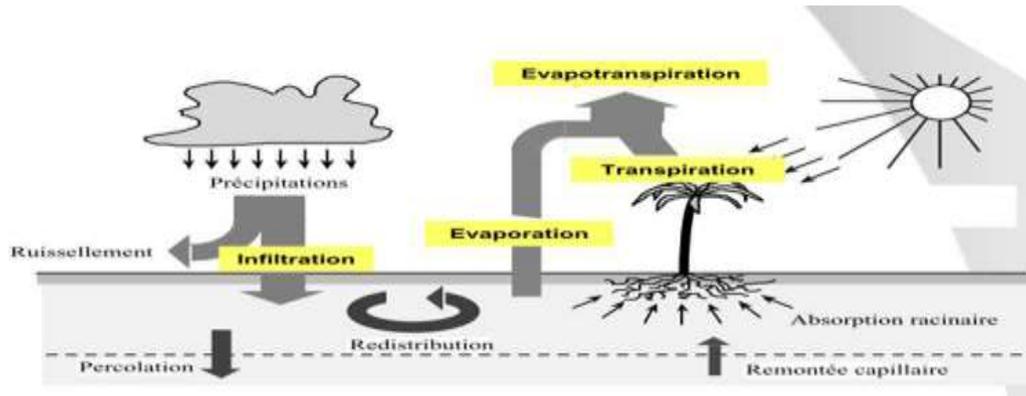


Figure 2: Représentation du phénomène du bilan hydrique, (Niang, 2015)

V.1 Précipitation

Les précipitations sont les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Leur formation nécessite la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique qui dépend de la saturation (Musy,2005) . On utilise deux (2) appareils pour exprimer cette lame d'eau : le pluviomètre et le pluviographe.

V.2 Ruissellement

D'après Mounirou (2012), le ruissellement d'un point de vue hydrologique désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration. Legras et al. (2014) définissent le ruissellement comme un écoulement superficiel de l'eau à la surface du sol quand elle ne peut pas y pénétrer ou qu'elle y pénètre très peu. Le ruissellement a deux origines (Peigne et al 2013) :

- Lors de pluies intenses (comme les pluies d'orage), la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est inférieure à la quantité d'eau arrivant au sol dans le même laps de temps ; il correspond au ruissellement hortonien ou ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité décrit par (Mounirou, 2012).
- Si le sol est saturé d'eau, il ne peut plus infiltrer et absorber l'eau arrivant au sol ; il correspond au ruissellement par saturation du sol (Mounirou, 2012).

V.3 Drainage

Le drainage est un écoulement généralement vertical de l'eau qui se réalise grâce à la gravité entre les pores les plus grosses du sol (Legras et al., 2014) . C'est l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous

la seule influence de la gravité. Selon Daghari et al, (1988), le drainage est évalué par l'application de la loi du Darcy (Darcy, 1856; Richards, 1931) ; c'est-à-dire:

$$D = K(\theta) \frac{dH}{dZ} \quad (\text{Equation 2}) \quad \text{avec} \quad H = h - Z \quad (\text{Equation 3})$$

H : charge totale de l'eau dans le sol liée à la charge hydrostatique h

Z : profondeur de mesure à partir de la surface

Cette approche nécessite la connaissance de la relation liant la conductivité hydraulique K et la teneur en eau θ et deux mesures tensiométriques au-dessus et au-dessous de la profondeur de référence.

V.4 Variation de stock

Elle représente l'eau du sol, faisant partie de la phase liquide du sol, alimentant les racines des végétaux et constituant un espace de transition important pour l'eau des nappes souterraines (alimentation, évaporation). La quantification des flux se fait à l'aide de profils hydriques et repose sur l'application de l'équation de continuité (Musy, 2005). La loi de continuité exprime que la variation de la teneur en eau dans le temps est égale aux variations spatiales du flux :

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = -\frac{\Delta q}{\Delta z} \quad (\text{Equation 4}) \quad \text{ou encore} \quad \Delta q = -\frac{\Delta\theta \cdot \Delta z}{\Delta t} \quad (\text{Equation 5})$$

Avec :

$\Delta\theta$: variation de la teneur en eau [m^3/m^3] ; Δq : variation du flux transitant [mm/h] ; Δz : variation de la profondeur [mm] ; Δt : variation du temps [h].

V.5 Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration est la combinaison de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est le passage de l'eau en phase gazeuse à la surface du sol. Cette transformation est principalement générée par l'énergie solaire reçue par une faible épaisseur de la surface du sol. La transpiration est liée à l'activité chlorophyllienne de la plante (Legras et al., 2014) .

L'évapotranspiration réelle est déterminée à partir de l'évapotranspiration de référence ET0 estimée par l'équation de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) présentée en annexe 1, elle est multipliée par un coefficient cultural.

L'évapotranspiration peut être estimée par une pléthore de méthodes empiriques et physiques plus ou moins efficace en fonction de la disponibilité des données.

V.6 Remontée capillaire

On parle de remontée capillaire lorsque la nappe contribue à l'écoulement souterrain et à réalimenter le profil du sol et la plante.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Contexte écologique

a. Situation géographique

Le site d'étude est le bassin versant de Tougou. Il est situé dans la zone sahélienne au nord du Burkina Faso, dans la province du Yatenga. Compris entre les latitudes 13°37' et 13°41' nord et les longitudes 2°19' et 2°13' ouest, il présente une superficie de 37 km². Notre bassin est sous-bassin du Nakanbé, l'un des trois plus grands fleuves du Burkina Faso. L'accès au site, de la capitale Ouagadougou, se fait en empruntant la route nationale N2 sur 188 km jusqu'à Ouahigouya puis la route nationale N23 sur 22 km pour atteindre le village de Tougou où se situe le bassin. La figure 3 présente la localisation du bassin versant de Tougou.

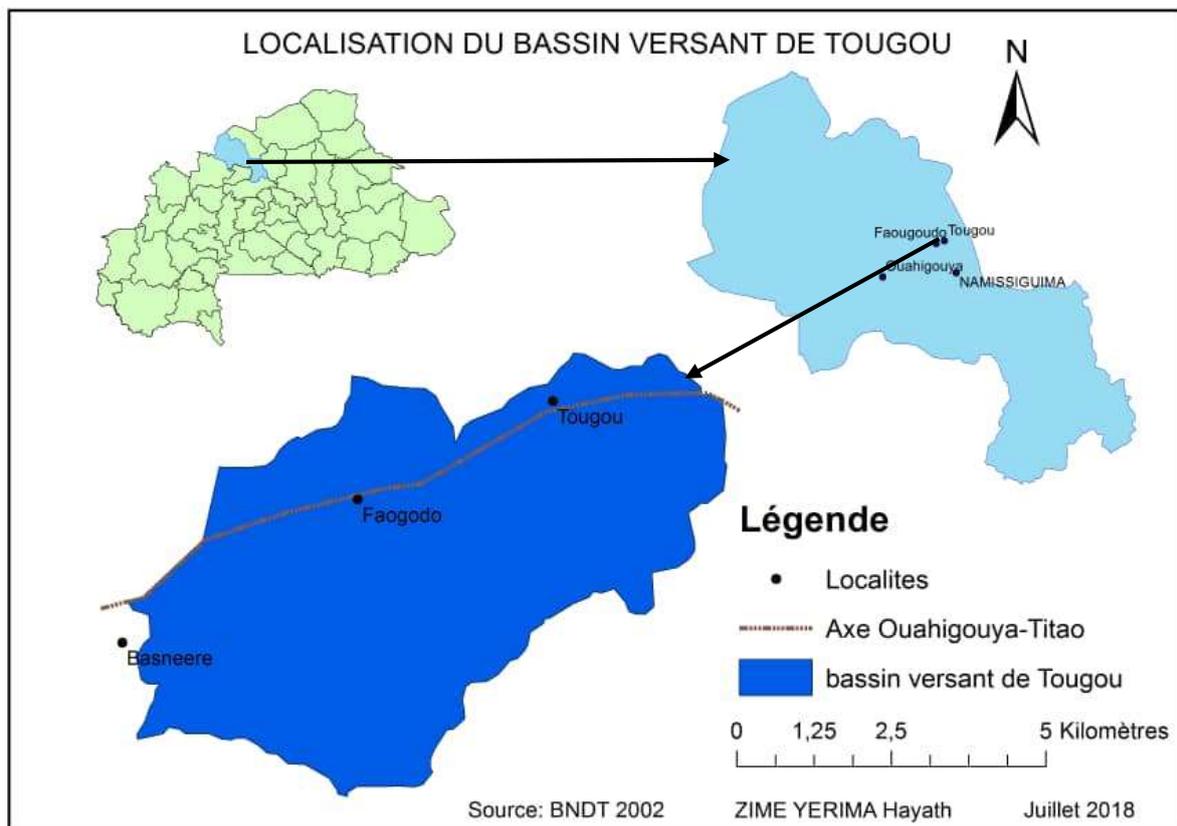


Figure 3: Localisation du bassin de Tougou

b. Climat

Le climat du bassin versant de Tougou est à l'image de celui de toute la zone sahélienne (Mounirou, 2012). Il est donc de type sahélien et caractérisé par deux saisons :

- ✓ Une courte saison pluvieuse de juin à octobre caractérisée par l'influence de la mousson qui est un vent maritime très humide et tiède de direction sud-ouest ;
- ✓ Une longue saison sèche de novembre à mai caractérisée par deux périodes. La première froide de novembre à février et l'autre chaude de mars à mai.

La pluviométrie moyenne annuelle à Ouahigouya est de 616 mm sur la période 1961-2010 avec des températures variant de 18°C à 42°C (Mounirou, 2012). Les précipitations sont irrégulières dans le temps et dans l'espace et se caractérisent par de fortes intensités, une faible abondance. Le mois d'août est le plus pluvieux. Les données pluviométriques de la Direction de la Météorologie Nationale présentées en annexe 1 ont permis la réalisation de la figure 4.

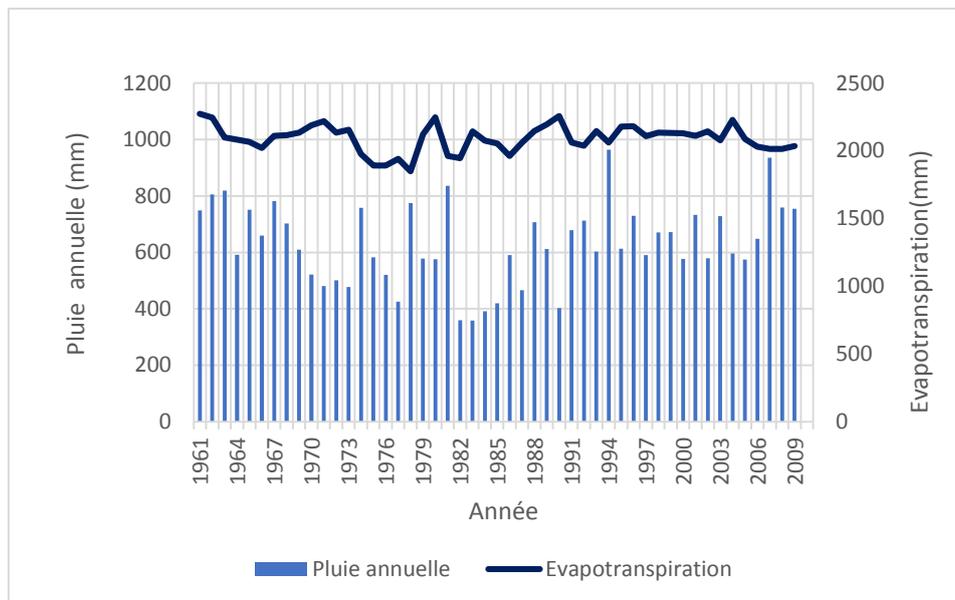


Figure 4: Evolution de la pluviométrie entre 1961 et 2009 de la station de Ouahigouya (Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso)

La figure 4 montre une variation des pluies annuelles suivant les années avec de valeurs maximales pouvant atteindre 964 mm et des valeurs minimales pouvant descendre jusqu'à 358 mm. On remarque une nette disparité entre les pluies et l'évapotranspiration qui dépasse 2000 mm. Il y a donc plus d'évapotranspiration, ceci serait dû à l'augmentation de la température.

La région de l'étude est caractérisée par deux principaux vents soufflant de manière alternative en saison sèche et saison des pluies. Il s'agit d'une part de l'harmattan qui souffle en saison sèche. C'est un vent sec et frais qui souffle de fin Septembre à Avril. Quant au second,

il s'agit de la pseudo-mousson, cet alizé maritime qui annonce la saison humide. Il est plus humide que le premier et peut atteindre des vitesses de plus de 15 km/h surtout quand il est précédé d'orage en début de saison, mai ou juin (KOUSSOUBE, 2006)

c. Hydrographie

Le bassin versant de Tougou est marqué par la faiblesse du réseau hydrographique. Les axes d'écoulement sont constitués de rigoles, de ruisseaux et de ravines qui concentrent et convergent les eaux vers le cours d'eau principal (KOUSSOUBE, 2006). Ce cours d'eau portant le nom de Bilampouanga est long d'environ 8,5 km et se jette dans le barrage de Tougou construit en 1962. La profondeur du lit mineur de ces axes d'écoulement varie entre 1 m et 2m et leur fond plat se raccorde à des berges plus ou moins redressées, ce qui confère aux lits une forme généralement en « U ». La rivière principale est un cours d'eau temporaire dont le drainage n'excède pas le mois d'octobre c'est-à-dire peu de temps après la fin de la saison humide (Mounirou, 2012). La carte présentant ce réseau est présentée en annexe 3.

d. Sol

Le bassin présente trois différents types de sol selon (KOUSSOUBE, 2006) ces trois types sont les suivants :

- ✓ Les sols peu évolués localisés généralement sur les pentes moyennes et inférieures et dans les zones de plaine. Ces sols sont formés sur du matériel de type kaolinite issu de roches acides variées.
- ✓ Les sols minéraux bruts représentés par les lithosols (résultant du morcellement de la roche). Ils occupent les sommets et les versants raides des buttes, les collines dont la dalle cuirassée connaît un processus de désagrégation mécanique ainsi que les hauts de pente de glacis.
- ✓ Les sols hydromorphes sont essentiellement soumis à un excès d'eau temporaire. Ils sont localisés dans les plaines alluviales, les terrasses et dans les dépressions périphériques.

Une carte représentative est présentée en annexe 4.

e. Végétation

On distingue deux formations végétales (Mounirou, 2012) :

- ✓ Les steppes (arborées et arbustives) qui sont des formations végétales clairsemées et recouvrant très peu le sol. Elles semblent être les plus importantes en terme de superficie occupée et se rencontrent généralement sur les versants des buttes, des collines, les bas glacis et sur les vieilles jachères

- ✓ Les territoires agroforestiers qui sont des couverts végétaux plus ou moins denses et présentant des taux de couverture assez élevés. Ils occupent en général les basfonds et les bordures des cours d'eau.

Il est présenté en annexe 5 un récapitulatif de quelques espèces végétales rencontrées sur le bassin versant de Tougou.

I.2 Contexte démographique et économique

a. Population et activités humaines

Le bassin versant de Tougou abrite trois principaux villages à savoir : Tougou, Faogodo et Basnéré, situés respectivement à 23, 18 et 20 km de Ouahigouya. Il est essentiellement peuplé de Mossi et de peuhls. Selon les résultats définitifs du Recensement Général de la Population et de l'Habitat, la densité de la commune de Namisiguima (dans laquelle est situé le bassin) est estimée à 112 hbts/km² (Mounirou, 2012).

Les populations du bassin versant de Tougou mènent plusieurs activités pour subvenir à leurs besoins. On peut citer : l'agriculture, la pêche et l'élevage. L'agriculture est l'activité la plus pratiquée. Essentiellement pluviale, elle est orientée vers la culture de céréales (mil, sorgho, maïs ...). Quand elle est irriguée, elle se pratique en saison sèche et concerne les cultures maraichères (tomate, oignon, aubergine, pomme de terre...) destinées à la vente. L'élevage constitue la deuxième activité des populations du bassin versant de Tougou exception faite de la frange peuhle. Il est pratiquée de manière extensive et concerne essentiellement les bovins, les ovins, les caprins et la volaille. La pêche est possible en raison de l'existence du barrage à l'exutoire du bassin. Elle est pratiquée à plein temps par les populations et de manière artisanale. A ces trois activités s'ajoutent le commerce, l'artisanat, la poterie et la forge.

b. Organisation sociale et administrative

Les villages du bassin sont régis par un pouvoir traditionnel de type centralisé avec à sa tête un chef de village qui est responsable de la sécurité des habitants et fait régner l'ordre dans le village. Le chef de village qui se fait entourer de notables est aussi le gardien des fétiches qui sont les garants de l'intervention du surnaturel dans la gestion de la (KOUSSOUBE, 2006). Trois religions étrangères sont pratiquées dans le bassin versant de Tougou. Il s'agit de la religion musulmane la plus pratiquée, le catholicisme et enfin la religion protestante en expansion considérable.

II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET COLLECTE DES DONNEES

II.1 Choix des pratiques culturales

Il existe plusieurs pratiques culturales comme nous l'avons montré dans la première partie de notre travail. Notre étude porte sur trois pratiques : le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune. Les pratiques culturales améliorent la gestion de l'eau et luttent contre l'érosion, problèmes existentiels dans la zone d'étude. D'après les études de (Barbier et al., 2009), l'adoption des pratiques culturales par les paysans au nord du Burkina (Tougou) présente les taux suivants : Cordon-pierreux (60%), Zaï (49%), Labour (46%), Paillage (21%), Demi-lune (6%). Cela montre que les paysans se sont familiarisés avec ses différentes pratiques culturales. Les techniques de zaï et de cordon pierreux sont toutefois les pratiques les plus adoptées dans la localité, ce qui justifie notre choix. Le choix de la demi-lune repose sur ses performances agronomiques élevées et le souci de sa valorisation.

II.2 Dispositif expérimental

a. Justification du choix du dispositif

Il est constitué d'un bloc de Fisher ou bloc aléatoire. C'est un dispositif comportant plusieurs blocs supposés homogènes où les traitements (pratiques, dans notre étude) sont randomisés et figurent une fois et une seule (Vilain, 1999). Un facteur non négligeable dans l'expérimentation est la répétition. Elle donne une estimation de la variance des mesures. En tenant compte du fait qu'il y a quatre (04) traitements et aussi des limites liées au coût, à la disponibilité d'un vaste terrain, un compromis est fait entre le nombre de traitement et le nombre de répétitions comme l'indique (Hudson, 1993). Il est suggéré dans le cas des études agronomiques liées au ruissellement un minimum de trois (03) répétitions pour tenir compte des variations liées à l'agronomie mais aussi au dispositif de mesure du ruissellement.

La dimension des parcelles dépend du but de l'essai. Pour de simples comparaisons de deux traitements, on peut par exemple utiliser de petites parcelles de 1 ou 2 m². Ce qui n'est pas notre cas. Nous avons quatre (04) traitements et l'étude va au-delà d'une simple comparaison. La plupart des parcelles d'expérimentation recevant des cultures sont de 100 m² (Hudson, 1993). Les grandes parcelles réduisent l'effet de la variation du sol. De ce fait, nous avons opté pour des parcelles de 200 m². De plus, étant donné que nous aurons des ruissellements à estimer, de petites parcelles ne pourraient permettre d'appréhender de façon

pertinente les pertes en eau. Le dispositif repose ainsi sur deux blocs en raison de la grande taille des parcelles, du nombre de pratiques.

b. Présentation du dispositif

Ce système est composé d'une station météo Watch dog pour la mesure des paramètres climatiques, d'un bac évaporatoire et de deux (2) pluviomètres (manuel et automatique). Le bloc de Fisher présente deux répétitions A et B comportant chacun 4 traitements placés de façon aléatoire. Les parcelles contenant les traitements présentent les dimensions de 20 x 10 m et sont les suivants : le témoin ou semi- direct (T0), le zaï (T3), la demi-lune (T2), le cordon pierreux (T1).

Les parcelles sur chaque bloc sont séparées par des tôles ondulées encastrées à 30 cm de profondeur avec une hauteur de 20 cm pour éviter les transferts d'eau entre les parcelles. Chaque parcelle est munie d'un partiteur et d'un fût pour la collecte des eaux de ruissellement, en plus de cinq cannes tensiométriques d'un tube d'accès à humidité comme présenté en figure 5 pour la détermination des charges de pression et les humidités de sol de façon journalière. Une photo de ce dispositif est présentée en annexe 6.

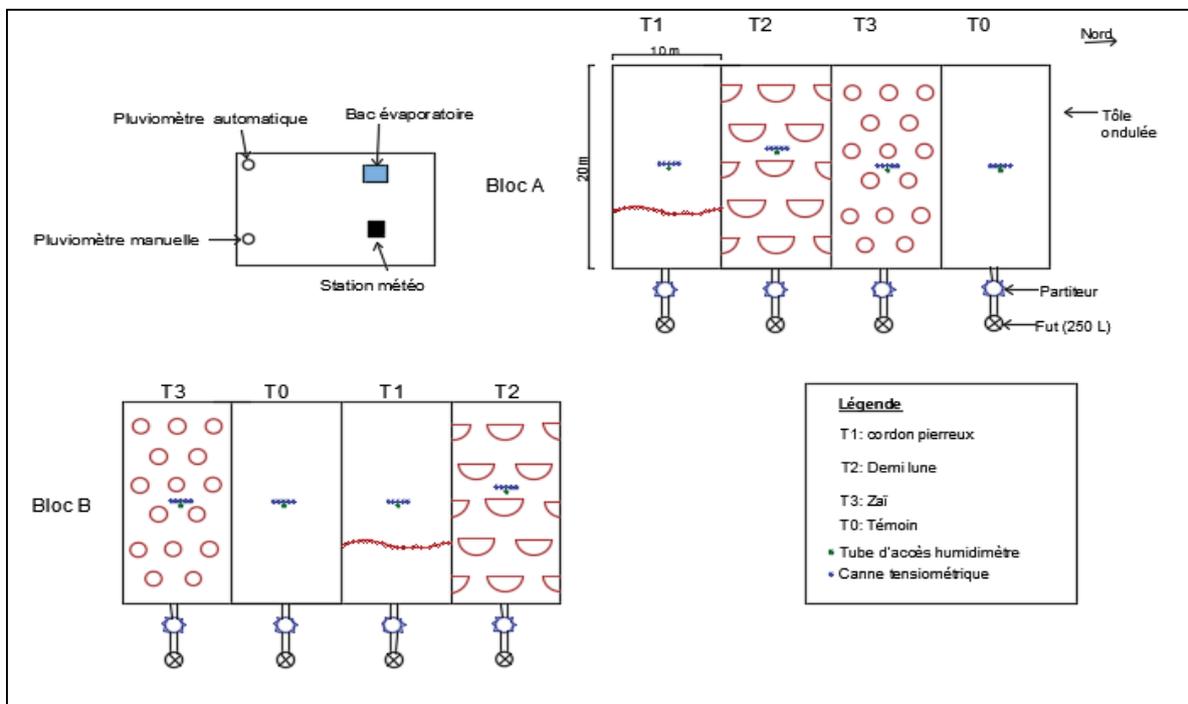


Figure 5: Vue en plan du site expérimental de Tougou

II.3 Itinéraires techniques

a. Description des pratiques

Les parcelles ont été aménagées selon les recommandations de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles du Burkina Faso (INERA).

- **Cordon pierreux** : La parcelle de cordon pierreux ou T1 présente une longueur de 20 m, il n'existe donc qu'une ligne de cordon de pierres le long des courbes de niveau d'une distance de 10 m représentant la largeur de la parcelle. Les pierres sont encastrées à 15 cm de profondeur et disposés à 15 m de l'amont de la parcelle. Les espacements entre les pieds de plants sont de 60 x 60 cm.

- **Zaï** : La parcelle de zaï représente la parcelle T3. Les poquets de zaï présentent un diamètre variant entre 20 et 40 cm avec une profondeur de 10 à 15 cm. Ecartés de 80cm x 80 cm, ils sont disposés en quinconces pour recueillir le maximum d'eau de ruissellement.

- **Demi-lune** : Les cuvettes de demi-lune (parcelle T2) ont un diamètre de 4 m avec une profondeur de 15 à 25 cm. Elles sont disposées en quinconce avec des ouvertures perpendiculaires au sens de l'écoulement des eaux. Les espacements entre les demi-lunes sont de 2 m. Les espacements entre les pieds de plants sont de 60 x 60 cm

- **Témoin** : Ces différentes parcelles sont comparées à une parcelle de référence appelée T0. C'est un semi-direct à la daba avec des espacements de 60 cm x 60 cm entre les pieds de plants.

b. Spéculation et amendements

Dans la zone de Yatenga, les céréales les plus cultivés sont le sorgho, le maïs, le mil. Dans notre étude nous opterons pour la culture du mil. Le mil choisi est de type IKMP5, du fait de sa précocité, sa résistance à la sécheresse. C'est une variété expérimentée par l'INERA qui a un cycle de 70 jours, avec une profondeur pouvant atteindre 100 cm.

Toutes les parcelles ont reçu avant semis une même quantité (15t/ha) d'apport en fumure organique (bouse de vache). Pendant la croissance, il y a eu un apport de fertilisant NPK (14-23-14) 2 à 4 g par poquet après la levée de la culture et d'urée (1 g par poquet) à la montaison. Les opérations qui ont suivi la mise en place de l'essai cette année et les périodes d'exécution sont présentées sur la figure 6 :

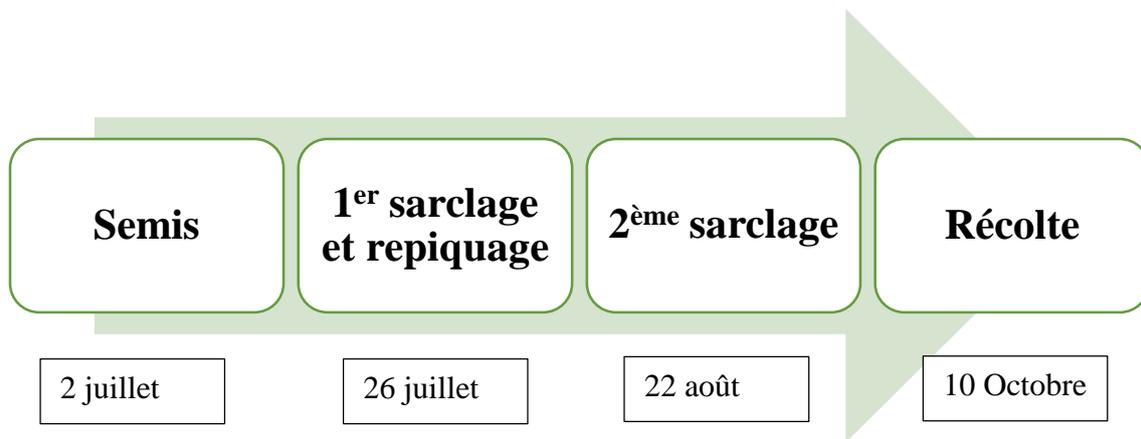


Figure 6: Calendrier des opérations culturales

II.4 Collecte des données

II.4.1 Conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique, facteur très déterminant de la dynamique de l'eau dans le sol est un coefficient de proportionnalité entre le débit volumique par unité de surface q , et le gradient de charge hydraulique H . Elle correspond à la capacité d'un milieu solide, d'un sol à transférer un fluide notamment l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique (Margat, Vallée, 1999). La conductivité hydraulique à saturation est la valeur limite lorsque le sol est saturé. On déterminera ce paramètre à partir du double anneau de MÜNTZ représenté en photo 7. La méthode consiste à infiltrer l'eau dans le sol sous charge constante de 3 cm dans l'anneau interne jusqu'à obtention du régime permanent.

Ces mesures ont été faites sur tous les blocs à hauteur de 9 répétitions par parcelle. La courbe de la capacité d'infiltration (figure 6) est obtenue en fonction du temps moyen et le point de jonction de l'asymptote à cette courbe et de l'axe des ordonnées correspond à la conductivité hydraulique à saturation. Le traitement de données des mesures d'infiltration est fait avec le logiciel Graph Pad Prism (Annexe 7)



Photo 7: Double anneau de MÜNTZ

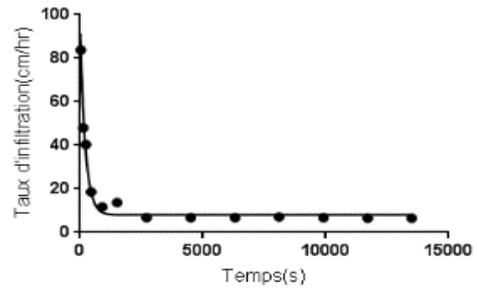


Figure 7: Courbe d'infiltration

La conductivité hydraulique à saturation insérée dans le module Soil Water Characteristics (SWC) du logiciel SPAW (Soil-Plant-Air-Water) développé par (Saxton, Willey, 2005) permet de connaître le type de sol et les humidités caractéristiques. C'est une calculatrice de propriétés hydrauliques du sol conçue à partir d'essais au laboratoire sur différents échantillons de sol.

II.4.2 Détermination des précipitations

Les appareils ou outils utilisés pour mesurer les précipitations sont : la station météo Watch dog (Spectrum Technologie INC, USA), un pluviomètre manuel et un pluviomètre automatique (Rainlogger Gold, Canada). Il faut noter que les données de pluie recueillies de ces trois appareils sont sensiblement égales. Nous utiliserons les données recueillies du pluviomètre manuel grâce à une éprouvette graduée.

II.4.3 Détermination du ruissellement

Disposant d'un partiteur et d'un fût sur chaque parcelle, le volume ruisselé y est collecté. Le ruissellement est quantifié à l'échelle de la parcelle de 200 m². Les eaux ruisselées convergent vers le partiteur présentant 40 orifices dont l'un est relié au fût comme l'indique la photo 8. Ainsi lorsque le partiteur (R=50 cm) est plein, c'est le fût (V=250l) qui collecte le surplus. La lame d'eau ruisselée est déterminée par la formule suivante :

$$Lr = \frac{Vp + 40 \times Vf}{S} \quad (\text{Equation 6})$$

Vp : Volume d'eau dans le partiteur ; Vf : Volume d'eau dans le fût ; S : Surface de la parcelle



Photo 8: Partiteur et fût à l'exutoire d'une parcelle

II.4.4 Détermination du drainage

Il est déterminé par application de la loi de Darcy qui exprime le flux proportionnel au gradient du potentiel hydraulique :

$$D = -K(h) \frac{dH}{dz} \Delta t \quad (\text{Equation 7})$$

D : Drainage; K : Conductivité hydraulique; H : Charge hydraulique ; h : Charge de pression ;
 Z : Charge gravitationnelle

La conductivité hydraulique est calculée à partir des paramètres de Rosetta présentés au tableau 3 par application de la formule suivante :

$$K(h) = K_s \times e^{\alpha h} \quad (\text{Equation 8})$$

Les paramètres K_s (conductivité hydraulique) et α (constante dépendant de la nature du sol) sont obtenus à partir de la courbe de Rosetta qui est une fonction de pédotransfert établi sur la base de la granulométrie. Nous avons utilisé cette fonction pour déterminer les paramètres ci-dessous à partir d'une analyse granulométrique du sol prélevé à 1 m de profondeur des parcelles expérimentales.

Tableau 2: Paramètres de Rosetta fonction de la granulométrie à 1 m de profondeur

	Ks (cm/h)	α (cm-1)
Paramètres de Rosetta	0,18	0,017

Charges de pression ou succion

Les mesures tensiométriques sont effectuées aux profondeurs d'implantation des tensiomètres (20, 40, 60, 80 et 120 cm) à l'aide d'un tensiomètre électronique SMS 2500S. Les cannes tensiométriques sont installées tout près du tube d'accès de la sonde TDR. Ce dispositif présenté sur la photo 9 permet de mesurer les charges de pression.



Photo 9: Tensiomètre

II.4.5 Détermination de variation de stock et l'évapotranspiration réelle

Pour calculer l'évapotranspiration de référence ET_0 , nous utilisons la méthode de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) car nous disposons des données climatiques de la station météorologique WatchDog (Spectrum Technologie INC, USA). L'évapotranspiration culturale (ETC) est en outre calculée et tient compte des besoins en eau spécifiques des cultures qui dépendent du stade de développement. Les variations du coefficient cultural du mil sont indiquées dans le tableau 3, c'est celui du mil standard de la FAO.

L'équation de l'évapotranspiration culturale se lit comme suit :

$$ETC = K_c \times ET_0 \quad (\text{Equation 9})$$

Avec ETC et ET_0 en mm/j, et K_c le coefficient cultural sans unité pour le mil. Le modèle suppose que l'évapotranspiration réelle (ETR) fonctionne à son taux maximal de ETC tant que l'eau est disponible dans le sol, c'est-à-dire tant que le stockage d'eau du sol S est capable de répondre à la demande :

$$ETR_j = ETC_j \text{ si } S_j \geq ETC_j$$

$$ETR_j = S_j \text{ si } 0 \leq S_j < ETC_j$$

Il faut noter que S_j correspond au stock d'eau du Jour J. Il est donc dynamique entre le Jour J et le Jour J-1.

$$\Delta S = S_j - S_{j-1} \quad (\text{Equation 10})$$

Le stockage de subsurface a été considéré comme complètement vide avant le début de la saison des pluies, car une longue période de sécheresse a précédé le début de la saison étudiée. Il est à retenir également que la condition de $S = 0$ n'implique pas nécessairement un sol complètement sec physiquement, mais plutôt un état où l'eau du sol ne peut être retirée par évapotranspiration (correspondant au point de flétrissement en termes de science du sol).

Tableau 3: Variation du coefficient cultural du mil

Phases	Jours	Kc
Initiale	0-14	0,3
Développement	15-39	1
Mi- saison	40-79	1
Fin de saison	80-105	0,3

II.4.6 Suivi de la croissance des plants

Notre étude a porté sur les paramètres hauteur et nombre de talles. A cela s'ajoute les paramètres nombre de feuilles par talle, périmètre du collet et diamètre de la couverture végétale mesuré en fin de cycle. La hauteur est mesurée de façon hebdomadaire une semaine après le semis à l'aide d'une règle graduée et par la suite avec des barres graduées qu'on positionne entre la base de la plante et le point le plus haut. Elle s'est faite sur 9 pieds choisis sur les diagonales dans chaque parcelle.

II.4.7 Estimation du rendement agricole

Le rendement d'un champ est le rapport de la production à la surface. Nous évaluerons le rendement en termes de grains et de paille. Il est déterminé sur neuf (09) plants, le poids moyens des grains ou de paille par plant. Le rendement est ensuite rapporté à l'hectare, connaissant le nombre de plants par hectare.

III. EVALUATION STATISTIQUE DES DONNEES

Nous utiliserons des box plots pour la représentation statistique des différents paramètres mesurés. Afin de vérifier l'homogénéité entre les parcelles de même nature (bloc A et bloc B), nous ferons des tests statistiques. En tenant compte du fait que nous avons des échantillons indépendants, et un effectif faible (inférieur à 30) nous appliquerons le test de Mann-Whitney

(non-paramétrique) et celui de Fisher (paramétrique) pour des comparaisons entre deux pratiques. Quant à la différence entre les pratiques, nous appliquerons le test de Kruskal Wallis pour une comparaison de plus de trois (3) pratiques. Toutes ces analyses se feront avec le logiciel de statistique Addinsofts XLSAT version 2016. Pour ces différents tests, on émettra des hypothèses, une hypothèse nulle (H_0) et une hypothèse alternative (H_a) avec un seuil de signification fixé à 0,05. Les différentes hypothèses de ces tests sont les suivantes :

- Test de Mann-Whitney
 - ✓ H_0 : Les deux échantillons suivent la même loi de distribution.
 - ✓ H_a : Les distributions des deux échantillons sont différentes.
- Test de Kruskal Wallis
 - ✓ H_0 : Les échantillons proviennent de la même population.
 - ✓ H_a : Les échantillons proviennent de populations différentes.
- Test de Fisher
 - ✓ H_0 : Le rapport entre les variances est égal à 1.
 - ✓ H_a : Le rapport entre les variances est différent de 1.

Les différents graphes seront réalisés à l'aide du logiciel Excel.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I. IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES SUR LES COMPOSANTES DU BILAN HYDRIQUE

I.1. Impact des pratiques culturales sur le ruissellement

I.1.1 Analyse des boîtes à moustache des coefficients de ruissellement

Les coefficients de ruissellement qui ont servi à réaliser ces boîtes à moustache sont présentés en annexe 8.

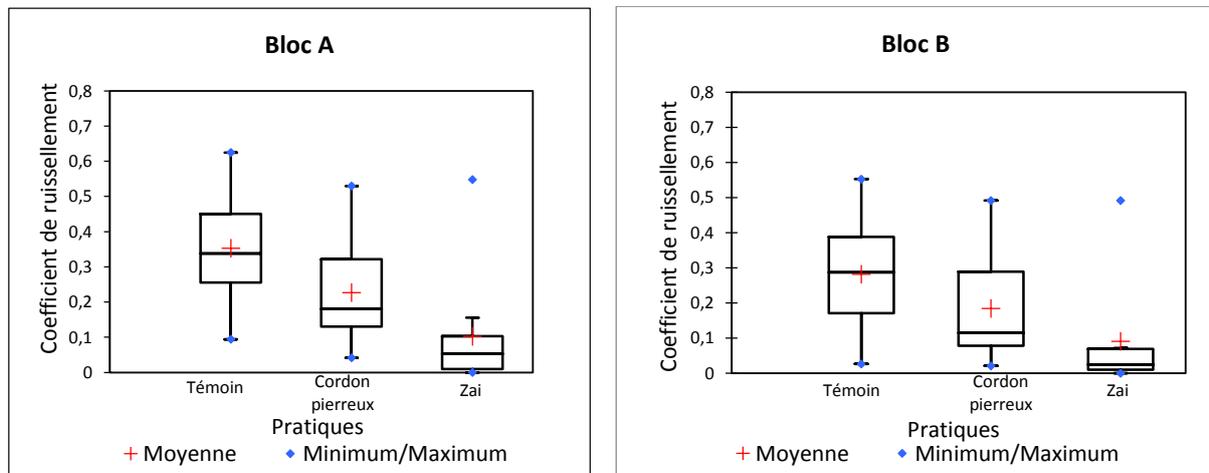


Figure 8: Boîte à moustache des coefficients de ruissellement

Le ruissellement est quasi-nul sur les parcelles de demi-lune car aucune pluie n'a provoqué un remplissage des cuvettes pour permettre un écoulement à l'exutoire. Le témoin présente le plus grand ruissellement suivi du cordon pierreux. Le zaï présente le ruissellement le plus faible. En dehors du outlier, 100% des mesures de ruissellement sur le zaï donne des valeurs de coefficients de ruissellement inférieur à 0,2. On constate que les variations de positions du bloc B sont similaires au bloc A. Les 2 boîtes à moustache ont présenté une différence des coefficients de ruissellement entre les pratiques (médian, moyenne). Les médians des témoins sont supérieurs aux deux autres. On note aussi une différence des quartiles. L'écart interquartile des parcelles témoin et cordon est plus large ce qui signifie que les valeurs sont plus dispersées. Il y a donc plus d'hétérogénéité dans les parcelles témoin et cordon pierreux que dans le zaï. Les parcelles de zaï sont les seules à présenter un coefficient aberrant. Les distributions des trois pratiques sont donc dissymétriques à droite c'est-à-dire que les valeurs ne se répartissent pas uniformément autour de la moyenne ou de la médiane, il y a, en plus au-

dessus de cette moyenne. La distribution est plus dissymétrique au niveau du cordon pierreux que de la parcelle témoin et le zaï qui illustrent une distribution relativement asymétrique.

1.1.2 Comparaison des moyennes : test de Mann-Whitney

Tableau 4: Résultat du test de Mann-Whitney sur les différentes parcelles de même nature

Pratiques	Témoin	Cordon pierreux	Zaï
p-value (bilatérale)	0,186	0,319	0,693
Hypothèse retenue	H0	H0	H0

On remarque que les p-values calculées sont supérieures au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$. On ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0. De plus, le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 18,62%, 31.9 % et 69.28% respectivement pour le témoin, le cordon-pierreux et le zaï. On peut donc conclure que les différentes parcelles sont homogènes deux à deux.

1.1.3 Comparaison des variances : test de Fisher

Tableau 5: Résultat du test de Fisher sur les différentes parcelles

Pratiques	Témoins	Cordons pierreux	Zaï
p-value (bilatérale)	0,773	0,996	0,849
Hypothèse retenue	H0	H0	H0

Etant donné que les p-value calculées sont supérieures au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 77,33%, 99.6% et 85% respectivement les témoins, les cordons-pierreux et les zaï. Les parcelles sont donc homogènes du point de vue ruissellement.

1.1.4 Comparaison des positions

- ✓ Test de Kruskal-Wallis

Tableau 6: Résultat du test de Kruskal Wallis sur les coefficients de ruissellement

p-value (bilatérale)	alpha
0.0000	0,05

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,01%. On peut donc conclure que les trois pratiques sont différentes.

✓ Test de Mann-Whitney

Tableau 7: Résultat du test de Mann-Whitney sur les coefficients de ruissellement

Pratiques	Témoin-Cordon pierreux	Témoin-zaï	Cordon pierreux-zaï
p-value	0,020	0,000	0,005
Hypothèse retenue	H_a	H_a	H_a

Les p-values calculées sont toutes inférieures au seuil de signification α qui est de 0,05. On peut donc conclure que les parcelles sont différentes entre elles.

Les résultats de ces différents tests permettent de conclure que les deux blocs A et B sont homogènes et que les pratiques sont différentes avec des ruissellements plus élevés au niveau du témoin et du cordon pierreux suivi par le zaï. Nous considérerons le bloc A pour le reste de l'étude.

1.1.5 Détermination des seuils de pluie du ruissellement

Les pluies peuvent ou non engendrer des ruissellements. Ces ruissellements varient en fonction des parcelles. Le seuil est déterminé à partir d'un nuage de point où la lame d'eau est fonction de la pluie. Il correspond au point moyen de détachement de l'axe des abscisses en tenant compte des effets de sarclage. Les graphes de la figure 9 présentent les seuils de pluies du ruissellement sur les différentes parcelles :

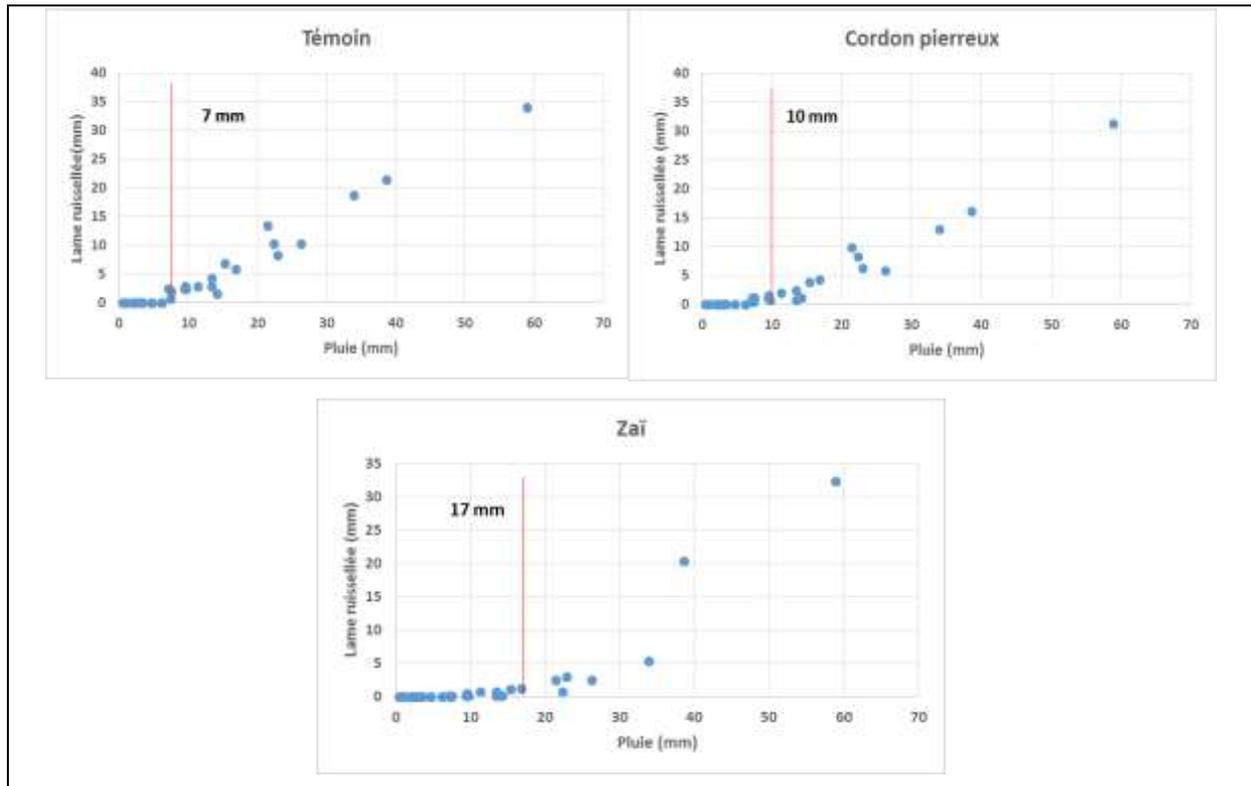


Figure 9: Seuils de pluies du ruissellement sur les différentes pratiques culturales

Les pluies minimales pouvant produire un ruissellement sont de 7, 10 et 17 mm respectivement pour le témoin, le cordon pierreux et le zaï. Le zaï a le seuil le plus élevé en raison des poquets qui collectent les eaux.

La performance des pratiques à réduire le ruissellement est principalement contrôlé par l'itinéraire technique spécifique à chaque pratique culturale (barrière pour les cordons pierreux, poquets pour le zaï et étangs pour demi-lunes), car les dépressions doivent être entièrement remplies avant de générer le ruissellement (disposition en quinconce).

I.2 Impact des pratiques sur l'évapotranspiration réelle et le stock d'eau du sol

La figure 10 montre l'évolution du stock d'eau du sol pour chaque pratique agricole. Dans l'ensemble, le stockage d'eau du sol est plus élevé pour les demi-lunes, suivi par le zaï, le cordon pierreux et enfin le témoin, ce qui confirme les différences de production de ruissellement observées précédemment. Cependant, même si la réduction du ruissellement est évidemment une condition préalable à l'augmentation du stock d'eau du sol, sa dynamique est également contrôlée par d'autres facteurs tels que l'évapotranspiration (figure 11) et le drainage. En 2017, les premières précipitations ont été faibles (13,5 mm ; 7,5 mm ; 2,7 mm...). Par conséquent, le stock d'eau de toutes les pratiques était faible jusqu'à 30-40 JAS et parfois vidé

pendant de courtes périodes dans la parcelle témoin. Juste après que le stock d'eau de toutes les parcelles a atteint sa pleine capacité (juste avant 40 JAS), il n'y a eu que deux précipitations de moins de 5 mm pendant 11 jours. La plus grande capacité de stockage du zaï et de la demi-lune ont permis de maintenir le stock d'eau plus longtemps que dans les parcelles témoins et cordon pierreux. Les techniques de zaï et de demi-lune ont réussi à atténuer les effets des poches sèches en limitant les pertes dues au ruissellement de surface. Les parcelles témoins et de cordon pierreux ont connu des sécheresses agricoles de 34 jours et 26 jours respectivement, ce qui a entraîné un déficit hydrique total de 102 mm et 60 mm comme l'indique la figure 11. Aussi, on constate que pour certaines poches de sécheresse (25 au 31 juillet ; 16 au 22 août ; 8 au 15 septembre) le stock d'eau s'annule sur le témoin et le cordon pierreux.

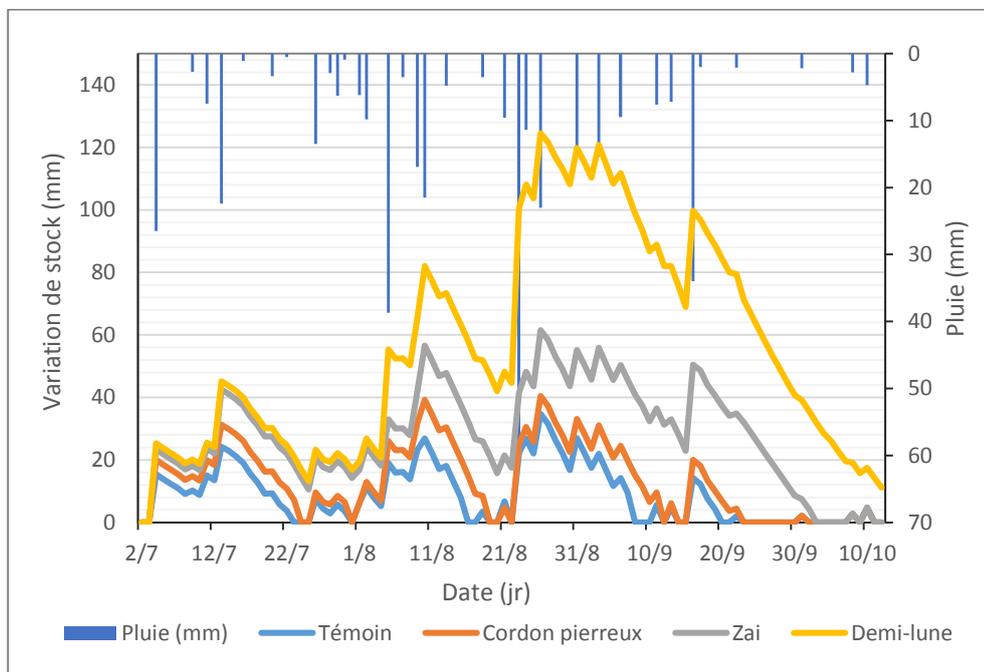


Figure 10: Evolution du stock d'eau sur les pratiques

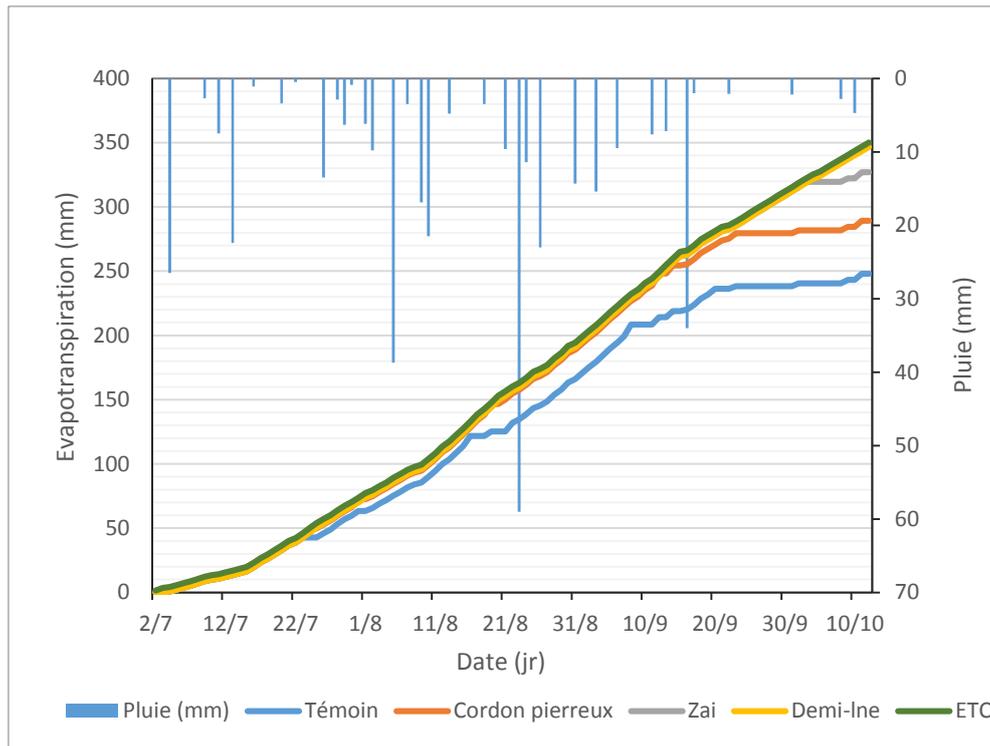


Figure 11: Evolution de l'évapotranspiration

I.3 Indicateurs de performance hydrique

Plusieurs indicateurs peuvent montrer les performances hydriques de nos pratiques culturales. La sécheresse pluviométrique représente les jours sans pluie, celle agricole correspond au jour où le stock s'annule. Le tableau 8 présente quelques indicateurs :

Tableau 8: Indicateurs de performance

Pratiques	Sécheresse pluviométrique (jrs)	Sécheresse agricole (jrs)	Déficit (mm)
Témoïn	67	34	102,07
Cordon pierreux	67	26	60,70
Zai	67	8	23,03
Demi-lune	67	0	0

On constate que pour un même nombre de jours de sécheresse pluvieuse, la sécheresse agricole et le déficit varie en fonction des pratiques. Ce tableau montre qu'il existe une relation entre la sécheresse agricole et le déficit hydrique. Plus le nombre de jours secs agricoles est

élevé, plus le déficit est grand. On peut donc dire que la demi-lune présente la meilleure performance car elle ne présente pas de déficit et donc aucun jour sec agricole. Tout le contraire du témoin qui présente les plus grandes insuffisances. Ces résultats montrent la capacité des techniques de zaï et de demi-lune à réduire l'effet des poches sèches pluviométrique sur les cultures.

I.4 Discussion

Les seuils de pluie du ruissellement sont de 7 mm, 10 mm et 17 mm respectivement pour le témoin, le cordon pierreux et le zaï. La demi-lune ne produit presque pas de ruissellement. Les résultats ont montré que les parcelles témoins présentent le plus grand ruissellement (supérieur à 150 mm), à l'opposé des demi-lunes dont le ruissellement ne dépasse pas 10 mm, inférieur au ruissellement de cordons pierreux et de zaï. Les parcelles témoins ne permettent pas une bonne infiltration des eaux de pluies, la grande partie étant perdue sous forme de ruissellement. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les parcelles témoins sont plus encroûtées et présentent moins de dépressions que les autres. Elles n'ont subi aucune modification du sol comme c'est le cas des autres parcelles, la couche superficielle est restée intacte. De ce fait elle caractérise parfaitement les sols encroûtés du sahel dû à l'action conjuguée de l'homme et du climat. Cette nature encroûtée reflète une compaction du sol. La compaction du sol réduit les capacités d'aération et d'infiltration des sols. Le compactage des sols accentue le ruissellement et les phénomènes d'érosion hydrique en diminuant leurs conductivités hydrauliques (Renault et al., 1994).

Contrairement au témoin, les autres techniques sont le résultat d'une modification physique du sol. Les dépressions plus ou moins importantes du sol au niveau du zaï et de la demi-lune changent la rugosité. Les poquets et les bourrelets formés concentrent les eaux dans la cuvette, empêchant ainsi le ruissellement. Plus la cuvette est grande plus la collecte est importante et le ruissellement réduit. Aussi, la lame d'eau contenue dans la cuvette s'infiltré lentement et assure une humidité durable du sol. Ceci explique donc le ruissellement faible et le stock élevé de la demi-lune par rapport au zaï. En ce qui concerne le cordon pierreux, le sol n'est pas excavé, mais la ligne de pierre ralentit l'écoulement. Par conséquent une lame d'eau est retenue à l'amont de la ligne et s'infiltré lentement. Les cordons pierreux induisent un frein hydraulique qui a pour effet de modifier la forme générale de la crue, d'augmenter l'infiltration et de retenir des sédiments ainsi que de réduire la compétence érosive du ruissellement (Albergel, Diop, 2012).

La variation de l'évapotranspiration entre les parcelles est induite par la différence de stock d'eau (expliquée précédemment), puisque que c'est l'eau stockée qui est restituée à la plante. La parcelle témoin ayant présenté un faible stock ne peut donc que présenter une faible évapotranspiration. Notons que la détermination de l'évapotranspiration n'a pas pris en compte la couverture végétale sur chaque parcelle, ce qui représente une limite de notre modèle de calcul. De fait, ces valeurs pourraient être surestimées sur les parcelles témoins et cordon pierreux car les stress hydriques répétés ont probablement impacté sur la croissance des plants.

II. IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A SATURATION DU SOL

II.1 Conductivité hydraulique

L'analyse des données d'infiltration (à 9 reprises sur chaque parcelle) a permis la détermination des conductivités hydrauliques à saturation moyenne présentées en figure 12. Après vérification de l'homogénéité des sols par le coefficient de variance, nous avons obtenu les courbes d'infiltration à partir du logiciel Graph Pad PRISM qui ont servi à évaluer la conductivité. Elles sont présentées en annexe.

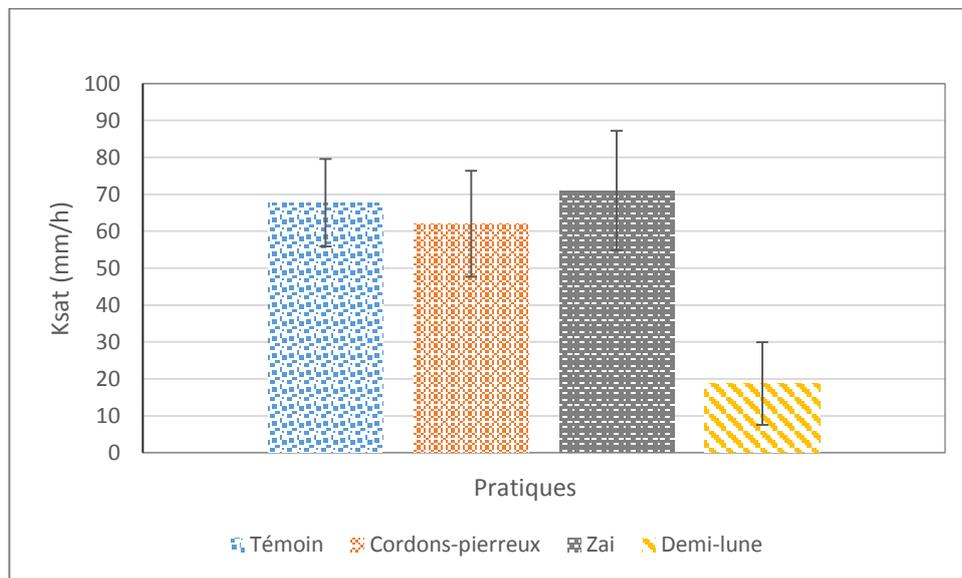


Figure 12: Variation des conductivités hydrauliques à saturation

La parcelle de demi-lune présente la conductivité la plus faible suivie du cordon pierreux. Les parcelles témoins et zai présentent les conductivités les plus grandes. Les écart-types sont assez faibles par rapport à la moyenne. En considérant les intervalles de confiance, on remarque que la différence entre témoin, cordon pierreux et zai n'est pas assez importante. Par contre, il

Il y a une réelle distinction entre ces dernières et la demi-lune. La conductivité élevée du zaï s'expliquerait par le fait de l'inexistence de la couche superficielle qui réduit l'infiltration. Cette explication n'est pas valable pour la demi-lune qui ne présente pas aussi de couche superficielle car cette dernière connaît un colmatage de sa cuvette. La parcelle de demi-lune a tendance à transporter beaucoup de matières en suspension qui lors de la phase de décantation ont tendance à colmater le sol rendant ainsi très faible la capacité d'infiltration. Aussi, avons nous pu déterminer la texture de chacune des parcelles à partir de l'analyse granulométrique menée au laboratoire LEMC (Laboratoire Eco Matériaux et Construction).

II.2 Texture du sol en surface des pratiques

La figure 12 présente les taux de constitution en sable, argile et limon à la surface des pratiques. Les courbes d'essai granulométriques sont présentées en annexe 9.

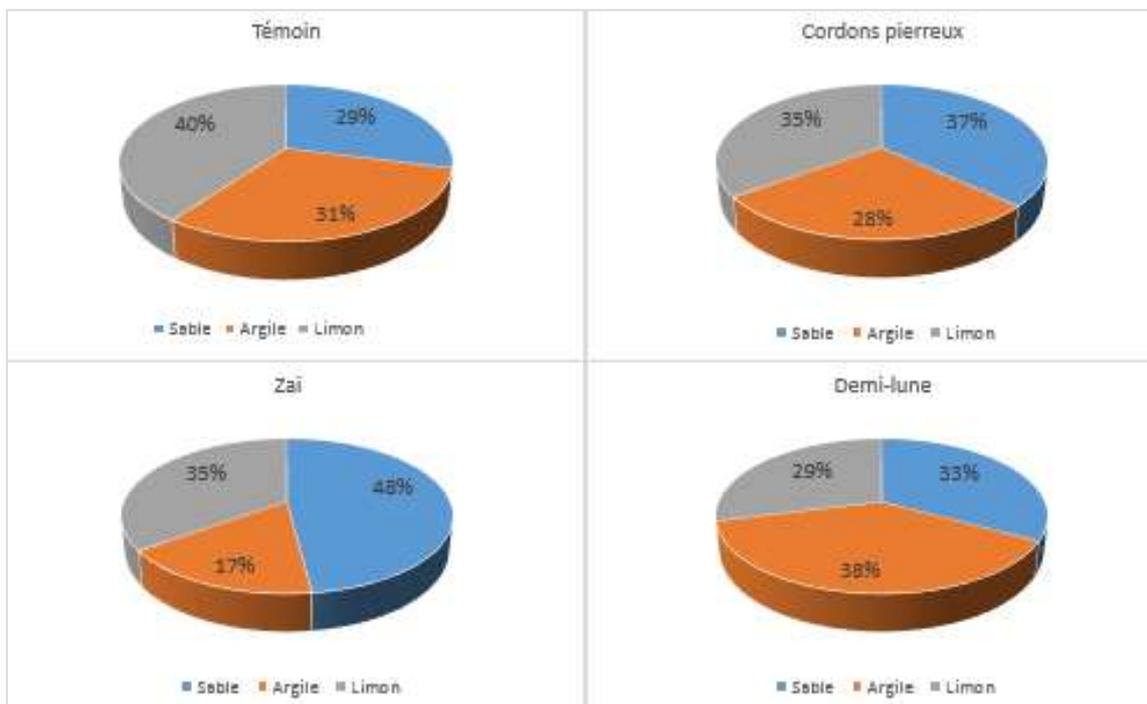


Figure 13: Texture du sol à la surface des pratiques

On constate que la texture en surface varie selon les pratiques. La demi-présente le taux le plus élevé d'argile (38%), ceci pourrait expliquer sa faible conductivité hydraulique puisque l'argile est un corps compact. Le zaï présente le taux le plus élevé de sable et le taux le plus faible d'argile, ce qui facilite l'infiltration d'où la grande capacité d'infiltration. Cette différence de proportions sur le zaï s'expliquerait par le transport des matières en suspension (matières fines) lors du ruissellement ce qui n'est pas le cas sur la demi-lune. La demi-lune a

tendance à transporter beaucoup de matières en suspension qui lors de la phase de décantation ont tendance à colmater le sol rendant ainsi très faible la capacité d'infiltration.

La conductivité hydraulique du sol permet de caractériser les transferts de l'eau et des matières à l'interface du sol. Ces transferts traduisent la capacité du sol à stocker et à transporter l'eau et les solutés (Abdou et al. 2015).. Toutefois, la capacité de stockage de la technique ne dépend pas uniquement de la conductivité hydraulique, mais aussi de la capacité de la technique à collecter les eaux. La demi-lune présente une faible conductivité, mais sa cuvette récupère plus d'eau que les autres techniques. Ceci explique le stock d'eau plus élevé. La demi-lune et le zaï présentent des rétentions importantes en surface. Bien que le zaï ait présenté une plus grande conductivité, son impluvium plus petit que celui de la demi-lune a induit le stock moins élevé par rapport à ce dernier, mais toujours plus grand que le témoin et le cordon pierreux qui n'en possèdent pas.

III. IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA PRODUCTIVITE AGRICOLE ET HYDRIQUE

III.1 Evolution en hauteur et les autres paramètres phénologiques des plants

III.1.1 Description de l'évolution

Les différentes hauteurs mesurées (annexe 10) de façon hebdomadaire ont permis de tracer les différentes courbes d'évolution présentées sur la figure 14.

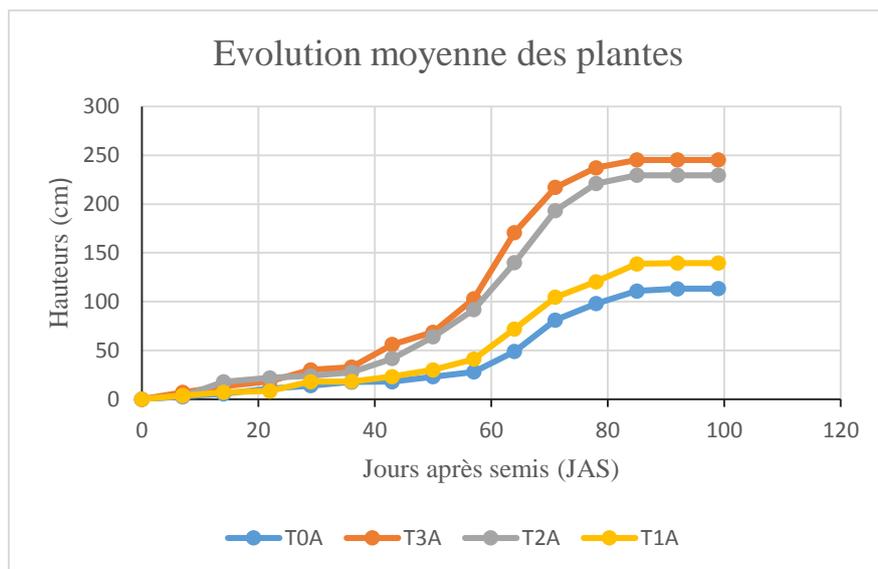


Figure 14: Evolution en hauteur des plantes

La croissance des plants de mil diffère en fonction des pratiques culturales. On remarque une évolution par paire, le zaï et la demi-lune sont semblables de même que le témoin et le cordon pierreux. On constate que cette évolution se caractérise essentiellement par 3 phases sur toutes les pratiques :

- ✓ La première phase se caractérise par une croissance lente
- ✓ La deuxième se caractérise par une élévation accélérée
- ✓ La troisième se caractérise par un arrêt de la croissance

Les hauteurs maximales varient entre 111 et 245 cm. Les accroissements les plus importants sont observés au niveau des zaï, suivis des demi-lunes. Les plantes de la parcelle témoin présentent la plus faible croissance avec une hauteur maximale atteignant 111 cm. Les différentes images de l'évolution des plantes sont présentées en annexe 12.

III.1.2 Caractérisation des phases de croissance

Les courbes d'évolution présentées en figure 14 présentent une différence entre les phases d'évolution. On constate que les phases ne débutent pas au même moment et n'ont pas la même durée. Le tableau 9 résume la durée et la vitesse de croissance de chacune des phases :

Tableau 9: Durée et vitesse de croissance des phases

		1^{ère} phase	2^{ème} phase	3^{ème} phase
Témoin	Durée (j)	0-57 JAS	57- 78 JAS	78-Fin du cycle
	Croissance (cm/j)	0,49	3,33	0,73
Cordons pierreux	Durée (j)	0-50 JAS	50-78 JAS	78-Fin du cycle
	Croissance (cm/j)	0,6	3,23	0,91
Zaï	Durée (j)	0-36 JAS	36-78JAS	78-Fin du cycle
	Croissance (cm/j)	0,91	4,87	0,38
Demi-lune	Durée (j)	0-36 JAS	36-78 JAS	78-Fin du cycle
	Croissance (cm/j)	0,77	4,6	0,41

On remarque que la première phase est plus longue (plus de 50 jours) pour le témoin et le cordon pierreux tandis que qu'elle est plus courte pour la demi-lune et le zaï (36 jours). Cette première phase de la demi-lune et du zaï représente deux phases du cycle de développement du mil : la phase initiale de 14 jours et une portion de la phase de développement qui dure 24 jours. En analysant la croissance, on remarque une faible variation en début de croissance. Par la suite

une augmentation rapide de la croissance sur la demi-lune et du zaï au 43^{ème} jour est observé tandis qu'au niveau du témoin et du cordon pierreux elle intervient le 57^{ème} jour. L'augmentation du taux de croissance marque le début de la deuxième phase qui représente essentiellement les phases de développement et de mi-saison du cycle normal du mil. Il s'ensuit une baisse de croissance qui marque la troisième et dernière phase de la croissance, fin et arrière-saison du cycle normal du mil. En comparant les croissances moyennes totales, on remarque qu'elle est plus grande au niveau du zaï, suivi de la demi-lune et du cordon pierreux ; le témoin présente la croissance la plus faible.

III.1.3 Caractérisation du sigmoïde représentant l'évolution des plantes

La phase initiale de croissance d'une plante suit une loi exponentielle du fait d'une évolution continue tant qu'il n'y a pas de limitations intrinsèques à la plante ou liées à l'environnement. Dans la phase exponentielle, la croissance correspond à une augmentation des dimensions de la plante (hauteur, diamètre...). Dès que la limitation est imposée, la croissance dans le temps est modifiée selon une courbe sigmoïde. L'analyse de l'évolution des plantes sur chaque parcelle à partir du logiciel Graph Pad PRISM a permis de déterminer les caractéristiques de chaque sigmoïde. Les courbes obtenues sont présentées en annexe 13. Le tableau 10 résume les caractéristiques de chaque évolution.

Tableau 10: Caractérisation des sigmoïdes de croissance

	Témoin	Cordons pierreux	Zaï	Demi-lune
Sommet	117,3	145,8	253,1	238,2
Fond	8,73	8,2	13,9	13,1
Pente	0,06	0,05	0,05	0,05
LogEC50	66,77	64,81	59,14	60,91
Portée	108,6	137,6	239,2	225,1

Les différents paramètres de la sigmoïde sont indentifiables sur la figure suivante :

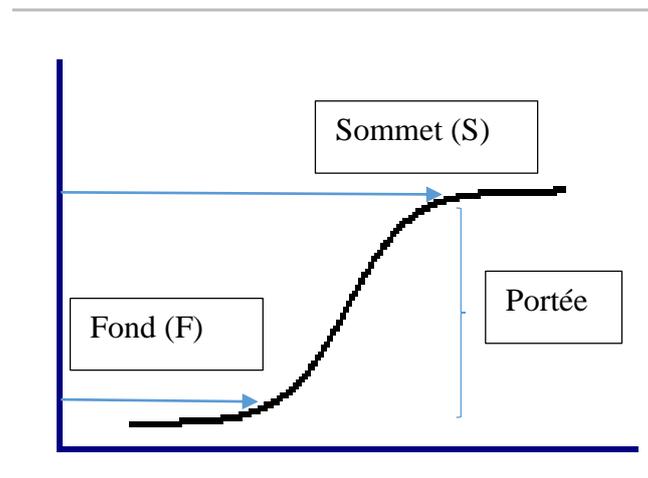


Figure 15: Paramètres de la sigmoïde

Ces caractéristiques permettent d'établir l'équation de la sigmoïde qui est la suivante :

$$y = F + \frac{S - F}{1 + 10^{((\text{LogEC50}-X)*\text{Pente})}} \quad (\text{Equation 11})$$

Les différentes équations des pratiques sont donc :

$$T0: y = 2,16 + \frac{2,19}{1 + 10^{((66.77-x)*6.10^{-2})}} \quad (\text{Equation 12})$$

$$T3: y = 4,52 + \frac{2}{1 + 10^{((59.14-x)*5.10^{-2})}} \quad (\text{Equation 13})$$

$$T2: y = 3,78 + \frac{2,25}{1 + 10^{((60.91-x)*5.10^{-2})}} \quad (\text{Equation 14})$$

$$T1: y = 2,4 + \frac{2,29}{1 + 10^{((64.81-x)*5.10^{-2})}} \quad (\text{Equation 15})$$

On obtient ainsi 4 équations différentes qui traduisent la croissance en hauteur au niveau de chaque parcelle. Ces différences de caractéristiques viennent confirmer les différences de croissance des plants constatées dans les parcelles.

III.1.4 Variation des différents paramètres de croissance suivant les pratiques

La talle représente la tige secondaire qui pousse à la base de la principale. Le nombre de talles varie aussi en fonction de nos traitements. Le nombre moyen de talles varie entre 4 et 12. Les

parcelles de demi-lunes et de zaï présentent le plus de talles tandis que le témoin présente le moins de talles. L'écart-type est faible pour ces différents paramètres

Pour ce qui est du deuxième paramètre, nombre de feuilles, il ne varie pas considérablement entre les différentes pratiques, mais le zaï et la demi-lune présentent le plus de feuilles. Il en est de même pour la variation des diamètres de collets. Notons que les feuilles sont plus petites et déshydratées sur les parcelles témoins et de cordon pierreux.

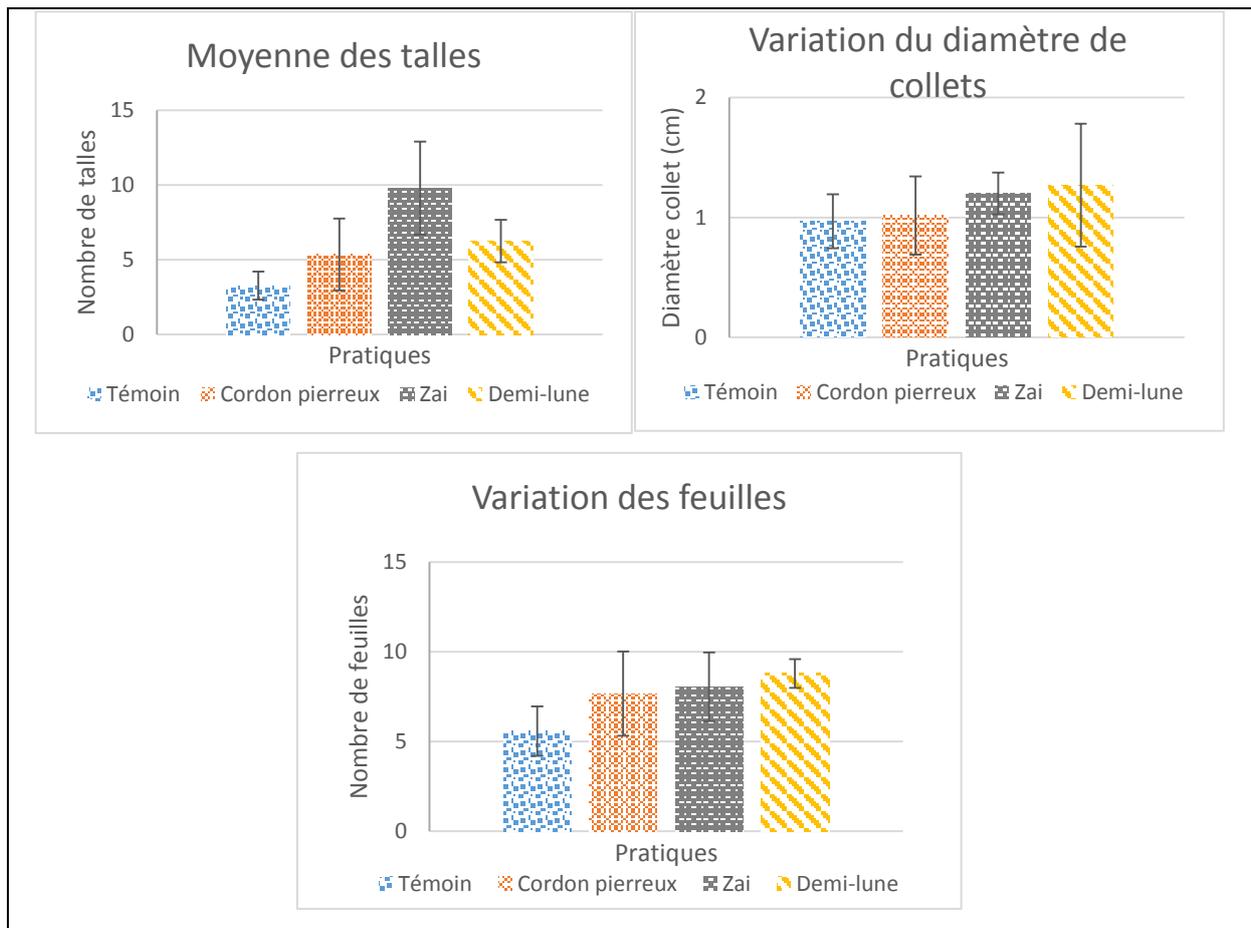


Figure 16: Variation des autres paramètres de croissance

III.2 Rendement grain

III.2.1 Analyse des boîtes à moustache de rendements

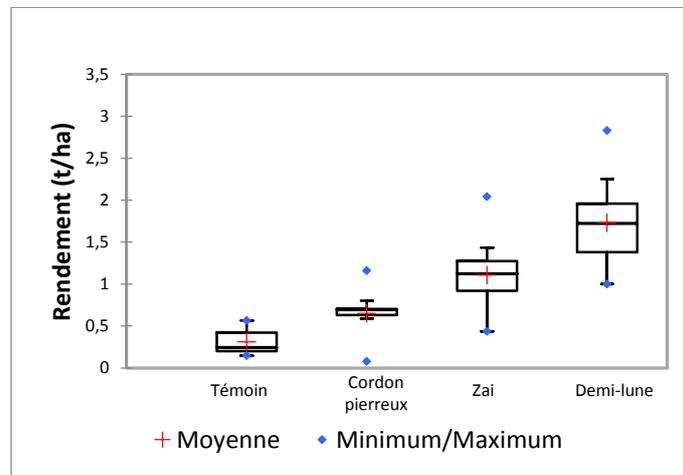


Figure 17: Boîte à moustache des rendements

On constate une différence entre les box plots qui présentent toutes des distributions asymétriques. Les écarts de demi-lune et de zaï sont plus larges ce qui se traduit par une plus grande hétérogénéité de ces pratiques par rapport au témoin et au cordon pierreux. La demi-lune présente le plus grand rendement, suivi du zaï et du cordon pierreux. Outre les valeurs maximales, le témoin, le cordon pierreux et le zaï procurent des rendements inférieurs à 1,5 t/ha. La parcelle témoin présente le rendement le plus faible. L'annexe 14 présente une image des différents rendements.

III.2.2 Test de comparaison sur le rang : test de Kruskal-Wallis

Tableau 11: Résultat du test de Kruskal Wallis sur les rendements

p-value (bilatérale)	Alpha
< 0,0001	0,05

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,01%. Les rendements des pratiques sont donc différents.

III.2.3 Comparaison unilatérale des moyennes : test de Mann-Whitney

Tableau 12: Résultat du test de Mann-Whitney sur les rendements

Pratiques	Témoins- Cordons pierreux	Témoins - Zaï	Témoins- Demi-lune	Cordons pierreux- Zaï	Cordons pierreux- Demi-lune	Zaï demi- lune
p-value (unilatérale)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Hypothèse retenue	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha

Les p-values calculées sont toutes inférieures au seuil de signification qui est de 0,05. On peut ainsi conclure que les rendements sont différents d'une pratique à une autre. Le témoin présentant le rendement le plus faible suivi du cordon pierreux et du zaï. La demi-lune présente le rendement le plus élevé.

III.3 Rendement biomasse

La figure 18 présente les variations de rendements en biomasse des différentes pratiques. On a relevé que les différences observées pour le rendement en grain sont les mêmes que pour le rendement en biomasse. La demi-lune est la meilleure, tandis que le témoin est le plus faible.

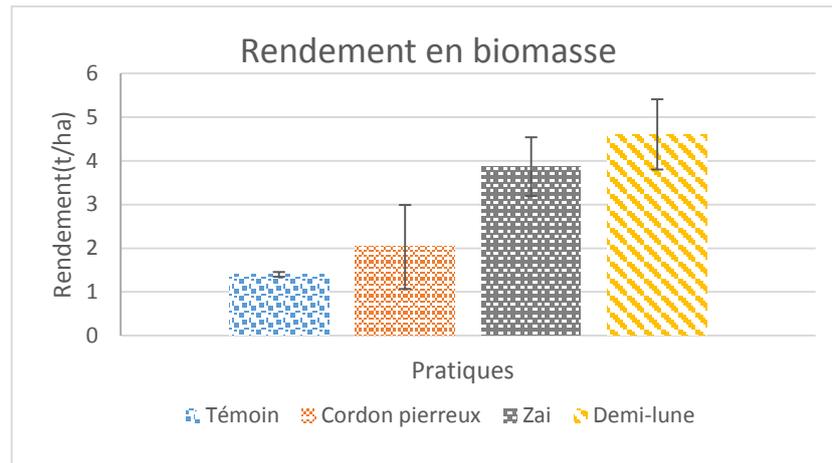


Figure 18: Variation du rendement en biomasse

III.4 Discussion

La croissance d'une plante peut se définir comme l'accroissement des dimensions de celle-ci (hauteur, diamètre...). Elle dépend des précipitations et de la fertilité du sol ; cette dernière selon MASSENET (2012) est la résultante de :

- ✓ Bonnes propriétés physiques de sol (aération, réserve en eau...)
- ✓ Bonnes propriétés chimiques (échange de substance nutritive entre sol et plante)
- ✓ Bonnes propriétés biologiques (vie microbienne intense)

Les plants de zaï et de demi-lune présentent les meilleures croissances en hauteur. Notons que ce sont ces mêmes pratiques qui présentaient les plus grands stocks d'eau avec un déficit hydrique faible ou quasi-nul. Les plants ont donc bénéficié d'une quantité d'eau pour résister aux poches de sécheresse. Aussi, les cuvettes des zaï et des demi-lunes ont permis la concentration de l'eau et des éléments nutritifs apportés par la matière organique au pied des plants. Par contre, dans les parcelles témoins, les nutriments connaissent une lixiviation sous l'effet du ruissellement. Or la matière organique, en plus d'être une substance nutritive est aussi une source de vie microbienne assurant la fonction biologique du sol pour une meilleure fertilité. Selon (Sangaré, 2002), l'apport de fumier et de paille ont permis d'améliorer l'effet travail du sol car ils permettent de relancer l'activité biologique en favorisant l'apparition de la faune du sol dont le rôle sur l'amélioration de la structure et de l'infiltration a été prouvé par de nombreux auteurs (Mietton, 1986 ; Mando, 1997). Ceci explique donc l'apparition des termites dans les demi-lunes et les zaï (Annexe 15). Les matières organiques améliorent la structure du sol, reconstituent son système poreux, améliorent sa capacité d'infiltration et de stockage de

l'eau et des nutriments (Bayala et al. 2012). Selon (Gelb, 2015), les termites facilitent la décomposition de matières organiques et augmentent les éléments nutritifs du sol. De plus, l'encroûtement du sol dans les témoins et les cordons pierreux limite l'enracinement des cultures. Le travail du sol permet d'ameublir le lit de semences et influence ainsi positivement la levée des plantules (Sangaré, 2002). Ceci explique la croissance plus lente au niveau du témoin et des cordons pierreux. L'effet des cordons pierreux s'est fait ressentir juste en amont de la ligne de pierre, car c'est le lieu de stagnation le plus important du ruissellement et ainsi du stockage. L'eau stagnée s'infiltré lentement et constitue le stock d'eau de la plante, d'où le déficit plus faible par rapport au témoin et le meilleur résultat généré. La meilleure croissance du zaï par rapport à la demi-lune pourrait s'expliquer par le fait que cette dernière a une durée de rétention d'eau pouvant dépasser 24h en cas de fortes pluies (L'annexe 16 présente des demi-lunes inondées). Certaines pluies ont causé l'inondation des plants de mil, or le mil est une culture qui résiste à la sécheresse et ne supporte pas l'eau (Sangaré, 2002). Cela représente un léger frein à la croissance.

Le rendement constitue l'expression matérielle de la nutrition hydrique et minérale de la culture. C'est le paramètre le plus en vue pour exprimer la performance des techniques de production (Sangaré, 2002). Les inégalités dans la croissance des cultures aboutissent à une inégalité des rendements. Le faible rendement des témoins et des cordons pierreux est donc la conséquence du fort ruissellement qui ne permet pas à la matière organique de jouer son rôle ; de même la nature encroûtée du sol qui limite l'infiltration (stock insuffisant) ne facilite pas l'enracinement pour une meilleure croissance de la plante. Le rendement élevé des demi-lunes et des zaï s'expliquerait par leur stock d'eau élevé surtout au niveau de la demi-lune (rendement plus élevé) qui rend possible la résistance aux poches de sécheresse. La demi-lune accumule l'eau à travers ses cuvettes qu'elle restitue plus lentement à la plante pour une meilleure croissance. Ce qui n'a pas été le cas des témoins et des cordons pierreux qui présentaient des déficits hydriques.

CONCLUSION

La présente sur le site expérimental de Tougou étude a visé l'évaluation de l'impact des pratiques culturales sur le bilan hydrique, la croissance des plants et le rendement agricole. La démarche suivie reposait principalement sur la détermination des paramètres du bilan hydrique. Ainsi avons-nous eu à évaluer sur toutes les parcelles d'expérimentation, le ruissellement, l'évapotranspiration réelle et la variation du stock d'eau qui sont tous des paramètres importants dans l'évaluation de cette performance. De plus, une caractérisation des sols a été faite à travers la détermination des conductivités hydrauliques à saturation par le double anneau de MÜNTZ et la détermination de la texture par l'essai granulométrique. Nos recherches nous ont aussi conduits à la détermination de l'impact des pratiques culturales (zaï, cordons pierreux et demi-lune) sur le bilan hydrique, la croissance des plantes et le rendement agricole. Les différents tests statistiques (Mann-Whitney, Kruskal Wallis...) effectués sur les paramètres mesurés ont montré des différences significatives entre les pratiques. Il ressort de cette étude que la demi-lune et le zaï procurent de meilleurs résultats que le cordon pierreux aussi bien en termes de performances hydriques que de croissance des plants ou de rendement. Le classement par ordre d'efficacité par rapport au rendement de la pratique place la demi-lune en tête, suivi de zaï, de cordons pierreux et témoin. Les pratiques culturales venant en tête de ce classement concentrent les eaux et les matières organiques dans des cuvettes qui sont ensuite restituées aux plantes. Ces plantes ne subissent pratiquement pas de stress hydrique ce qui n'est pas le cas du témoin et du cordon pierreux qui présentent des déficits différents. S'agissant du cordon pierreux, la ligne de pierre freine le ruissellement induisant ainsi l'infiltration qui produit un stock d'eau, d'où son rendement élevé par rapport au témoin. La demi-lune quant à elle est exposée aux risques d'engorgement d'eau pouvant asphyxier les plants en cas de pluies diluviennes et d'inondations. C'est le cas observé au cours de notre recherche avec les pluies des 05 et 23 août 2017 (de 38 mm à 59 mm d'eau) qui ont causé une rétention de plus de 24h sur les parcelles de demi-lune. En définitive, retenons que le semis direct n'est pas productif dans les sols qui connaissent diverses dégradations. L'adoption de pratiques culturales modernes ou actualisées visant à restituer à ces sols leurs ressources perdues ou dégradées s'impose. C'est ce que notre recherche a essayé d'établir.

LIMITES ET RECOMMANDATIONS

Les limites et recommandations sur notre travail se présentent sur deux points. Le premier concerne les pratiques culturales et le second porte sur la recherche.

Les pratiques culturales actuelles dans le bassin versant de Tougou présentent plusieurs avantages, mais aussi des limites pour certaines d'entre elles. Comme nous l'avons remarqué dans notre étude, la demi-lune peut conserver une lame d'eau pendant 24 h. Ce qui n'est pas le cas du zaï où la lame d'eau dure environ 2h. De ce fait une culture ne résistant pas à l'eau ne serait pas adaptée à cette pratique. Elle pourrait souffrir d'asphyxie en cas de fortes pluies, ce qui nuirait à son développement. Le caractère non filtrant de la demi-lune provoque l'inondation des plants et la stagnation de l'eau. Cela peut réduire les rendements des cultures sensibles à des l'excès d'eau. Aussi est-il recommandé avec la demi-lune un sarclo-binage dans la cuvette à cause du colmatage dû aux matières en suspension qui forment une couche imperméable (Roose, 1990), cité par (Hauchart, 2007). En ce qui concerne le cordon pierreux, ses résultats ne sont véritablement perceptibles qu'après des années à la suite au colmatage des vides entre les moellons. C'est une pratique qui ne donne de meilleurs résultats qu'avec le temps.

S'agissant enfin des limites de notre recherche :

- L'expérimentation a concerné une année hydrologique
- Le dispositif expérimental s'est limité à deux (2) répétitions
- Le modèle de simulation du bilan hydrique est essentiellement hydrologique et ne tient pas compte des paramètres agronomiques

BIBLIOGRAPHIE

- Abdou, M.M., Vandervaere, J.-P., Descroix, L., Moussa, I.B., Maiga, O.F., Abdou, S., Seyni, B.B., Daouda, M.L.O. (2015). Evolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé dans l'Ouest du Niger. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 19, 270.
- Albergel, J., Diop, S. (2012). Aménagements hydrauliques innovants pour la gestion conservatoire des eaux et des sols sur le tracé de la Grande Muraille Verte.
- Albergel, J., Carbonnel, J.P., Grouzis, M. (1984). Péjoration climatique au Burkina Faso. *Cah. Orstom, Ser. Hydro.* 12, 3–19.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome* 300, D05109.
- Barbier, B., Yacouba, H., Karambiri, H., Zoromé, M., Somé, B. (2009). Human vulnerability to climate variability in the Sahel: farmers' adaptation strategies in northern Burkina Faso. *Environmental Management* 43, 790–803.
- Bayala, J., Sileshi, G.W., Coe, R., Kalinganire, A., Tchoundjeu, Z., Sinclair, F., Garrity, D. (2012). Cereal yield response to conservation agriculture practices in drylands of West Africa: a quantitative synthesis. *Journal of Arid Environments* 78, 13–25.
- BILLAZ, R. (2012). La lutte contre les aléas climatiques au Burkina Faso Acquis et défis de l'agro-écologie: le cas de la Région Nord. *Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières*.
- Bousquet, E. (1997). Réflexion sur la modélisation de divers phénomènes de dégradation des terres d'une région du Burkina Faso (Région du Yatenga). Annexes.
- Casenave, A., Valentin, C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration (ORSTOM).
- Daghari, H., Laroussi, C., Maalej, M., de Backer, L.W. (1988). Development of a Model for Production of Water Transfer in a Semi-arid Zone in Tunisia (Elaboration d'un Modèle de Prediction du Transfert Hydrique sous Jachère dans les Zones Semi-arides de la Tunisie). *Computer Methods and Water Resources: First International Conference, Morocco 1988*. p.
- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application... (Victor Dalmont).
- PANA (2007). Programme d'Action National d'Adaptation à la Variabilité et aux Changements Climatiques (PANA du Burkina Faso).
- Diello, P. (2007). Interrelation climat-homme-environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. 303p.
- Gelb, J. (2015). Sorghum yield and zaï holes in Goundi, Burkina Faso. PhD Thesis. Michigan Technological University.
- Hauchart, V. (2007). Durabilité de l'agriculture en fonction des pratiques culturales actuelles et conseillées (Burkina Faso et Nord Ghana).
- Heinrigs, P. (2010). Incidences sécuritaires du changement climatique au Sahel: perspectives politiques. *Projet D'étude Cofinancé Par Le Ministère Français Des Affaires Étrangères et Européennes et Par Le Ministère Britannique Des Affaires Étrangères et Du Commonwealth et Coordonné Par Le CSAO/OCDE*.
- Hubert, N.O. (2009). Vulnérabilité, impacts et stratégies d'adaptation des populations locales à la variabilité et aux changements climatiques. *Centre Regional Agrhyment, Document Pdf*.
- Hudson, N. (1993). Field measurement of soil erosion and runoff (Food & Agriculture Org.).

- Kambou, N.F., Zougmore, R. (1995). Évolution des états de surface d'un «Zipellé» soumis à différentes techniques de restauration des sols (Yilou, Burkina Faso). *Bull. Rés. Érosion* 16, 19–32.
- Karambiri, H. (2003). Crues et érosion hydrique au Sahel: étude et modélisation des flux d'eau et de matières sur un petit bassin versant pastoral au nord du Burkina Faso. PhD Thesis. Paris 6.
- KOUSSOUBE, A. (2006). Dynamique du couvert végétal et de la production agricole du bassin versant de Tougou (au nord du Burkina Faso) (2iE).
- Leblanc, M.J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S.O., Loireau, M., Cappelaere, B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* 61, 135–150.
- Legras, O., Ubertosi, M., Brulebois, E., Amiotte-Suchet, P., Rossi, A., Castel, T., Richard, Y., BRAYER, J., Doney, C., Pinson, S. (2014). Évolution du bilan hydrique à l'échelle de bassins versants en contexte de changement climatique—mise place d'une méthodologie. XXVIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, pp. 454–459.
- Malam Abdou, M. (2014). États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. PhD Thesis. Grenoble.
- Mando, A. (1997). The role of termites and mulch in the rehabilitation of crusted Sahelian soils (Mando).
- Mando, A., Zougmore, R., Zombré, P.N., Hien, V. (2000). La réhabilitation des sols dégradés en Afrique Sub-Saharienne. *La Jachère En Afrique. Jhon Libbey, Paris* 150–175.
- Margat, J., Vallée, D. (1999). Ressources en eau et utilisations dans les pays méditerranéens: repères et statistiques. *Plan Bleu, Sophia Antipolis*.
- MASSENET, J.Y. (2012). Propriétés physiques du sol. *Pédologie*, 54p.
- Mietton, M. (1986). Méthodes et efficacité de la lutte contre l'érosion hydrique au Burkina Faso. *Cah Orstom Ser Pedofil* 22, 181–96.
- Mohamed, A.B., Van Duivenbooden, N., Abdoussallam, S. (2002). Impact of climate change on agricultural production in the Sahel—Part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change* 54, 327–348.
- Mounirou, L.A. (2012). Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso: quantification et transposition des données. PhD Thesis. Montpellier 2.
- Niang, D. (2006). Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le Sahel burkinabè. *Lausanne, EPFL* 135 p.
- NIANG, D. (2015). Physique du sol (2iE).
- Ouedraogo, M. (1999). Contribution) à l'évaluation de l'impact Economique des Changements climatiques sur l'Agriculture Marocaine (Institut agronomique et vétérinaire Hassan II).
- Ouedraogo, M., Dembélé, Y., Somé, L. (2010). Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations: cas des paysans du Burkina Faso. *Science et Changements planétaires/Sécheresse* 21, 87–96.
- Pallo, F.J.P., Sawadogo, N., Zombré, N.P., Sedogo, M.P. (2009). Statut de la matière organique des sols de la zone nord-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 13, 139–142.
- Renault, P., Sierra, J., Stengel, P. (1994). Transfert d'oxygène et anoxie dans les sols agrégés: contribution à l'étude de la dénitrification. *Agronomie* 14, 395–409.
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318–333.

- Roose, E. (1990). Méthodes traditionnelles de gestion de l'eau et des sols en Afrique Occidentale soudano-sahélienne: définitions, fonctionnements, limites et améliorations possibles. *Bulletin-Réseau Erosion* 98–107.
- Roose, E., Kabore, V., Guenat, C. (1993). Le zaï: fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahiers-ORSTOM. Pédologie* 28, 159–173.
- Roose, E., Kaboré, V., Guenat, C. (1995). Le zaï, une technique traditionnelle africaine de réhabilitation des terres dégradées de la région soudano-sahélienne (Burkina-Faso). 25p.
- Sangaré, S. (2002). Evaluation des performances agro-écologiques des techniques de lutte contre la désertification dans les provinces du Passoré et du Yatenga. Cas du zaï, de la demi-lune et du tapis herbacé. *Cas Du Zaï, de La Demi-Lune et Du Tapis Herbacé. Mémoire de Fin D'étude IDR*, 84p.
- Sarr, B., Kafando, L., Atta, S. (2011). Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5, 1659–1675.
- Sawadogo, H., Bock, L., Lacroix, D., Zombré, N.P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 12, 279–290.
- Saxton, K.E., Willey, P.H. (2005). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *Watershed Models. CRC Press, Boca Raton, FL. Doi 10*, 401–422.
- Some, D., Hien, E., Assigbetse, K., Masse, D., Drevon, J.J. (2016). Culture d'une légumineuse et d'une céréale dans le système zaï avec différents amendements organo-minéraux-productivité et impact sur les propriétés biologiques d'un sol ferrugineux dégradé dénudé en Région nord soudanienne au Burkina Faso. *Tropicicultura* 34, 56–68.
- Vlaar, J.C.J. (1992). Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du sahel.
- Wellens, J., Compaore, N., Van Orshoven, J., Raes, D., Yacouba, H., Ouattara, A. (2003). Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation (Burkina Faso): Rapport Technique (2003).
- Zougmore, R., Zida, Z. (2000). Lutte antiérosive et amélioration de la productivité du sol par l'aménagement de cordons pierreux. *Fiche Technique n°1. Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole*.
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, N.F. (1999). Réhabilitation des sols dégradés: rôles des amendements dans le succès des techniques de demi-lune et de zaï au Sahel. *Bulletin Rés. Erosion* 19, 436–450.
- Zougmore, R., Guillobez, S., Kambou, N.F., Son, G. (2000). Runoff and sorghum performance as affected by the spacing of stone lines in the semiarid Sahelian zone. *Soil and Tillage Research* 56, 175–183.
- Zougmore, R., Kambou, F.N., Ouattara, K., Guillobez, S. (2000). Sorghum-cowpea intercropping: an effective technique against runoff and soil erosion in the Sahel (Saria, Burkina Faso). *Arid Soil Research and Rehabilitation* 14, 329–342.
- Zougmore, R., Jalloh, A., Tioro, A. (2014). Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. *Agriculture & Food Security* 3, 16.
- Ouedraogo 2005, Paillage - Recherche Google.
- Bonnes pratiques de conservation des eaux et des sols Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des producteurs au Sahel - Recherche Google.
- Cours "Hydrologie générale" - Prof. André Musy.

Peigne (2013) Ruissellement - Recherche Google.

ANNEXE

Annexe 1 : Calcul de l'évapotranspiration : formule de Penman Monteith

La formule de Penman Monteith (FAO) est la suivante :

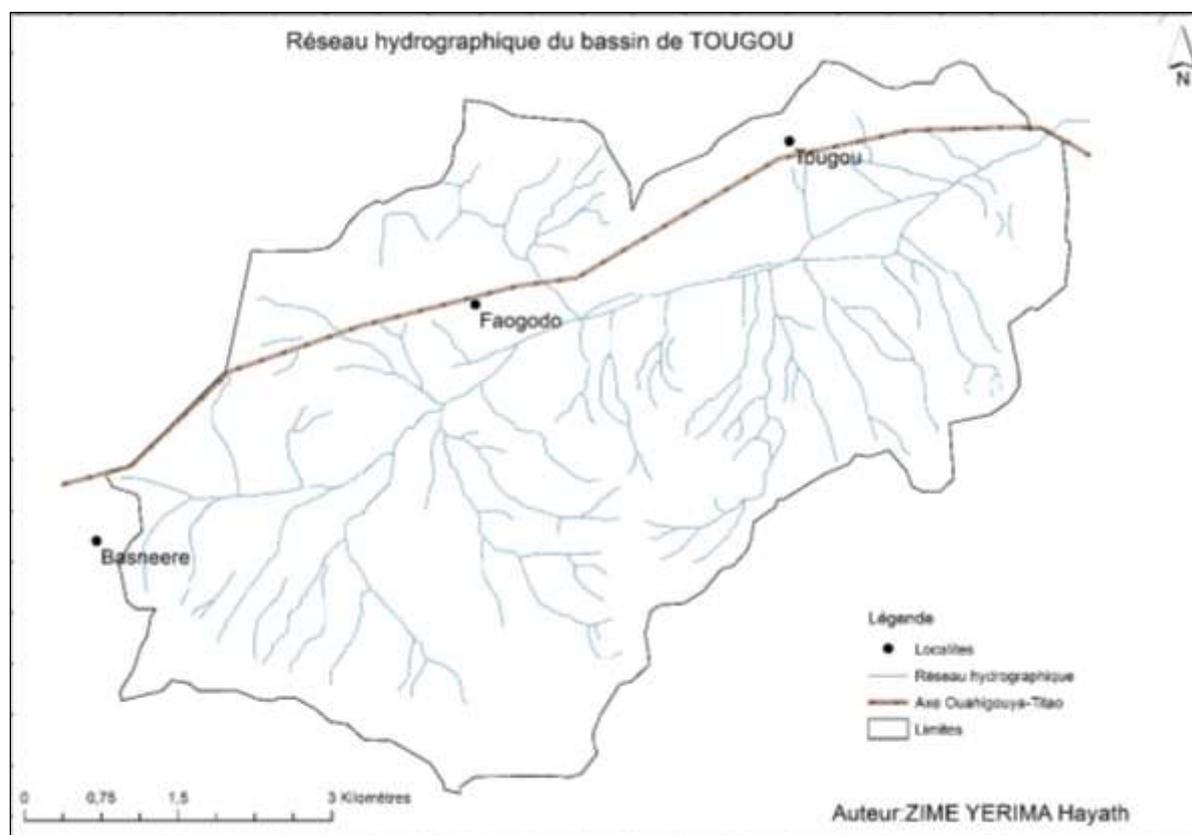
$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \times \frac{e_n - e}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

- Rn : rayonnement net
- G : flux de chaleur du sol
- ρ_a : densité moyenne de l'air
- c_p : chaleur spécifique d'air
- λ : chaleur latente de changement d'état (2450 kJ.kg)
- e : tension de vapeur à la température t
- e_n : tension de vapeur saturante à la température t
- Δ : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante
- r_a : la résistance aérodynamique
- r_s : la résistance du couvert végétal
- γ : la constante psychrométrique

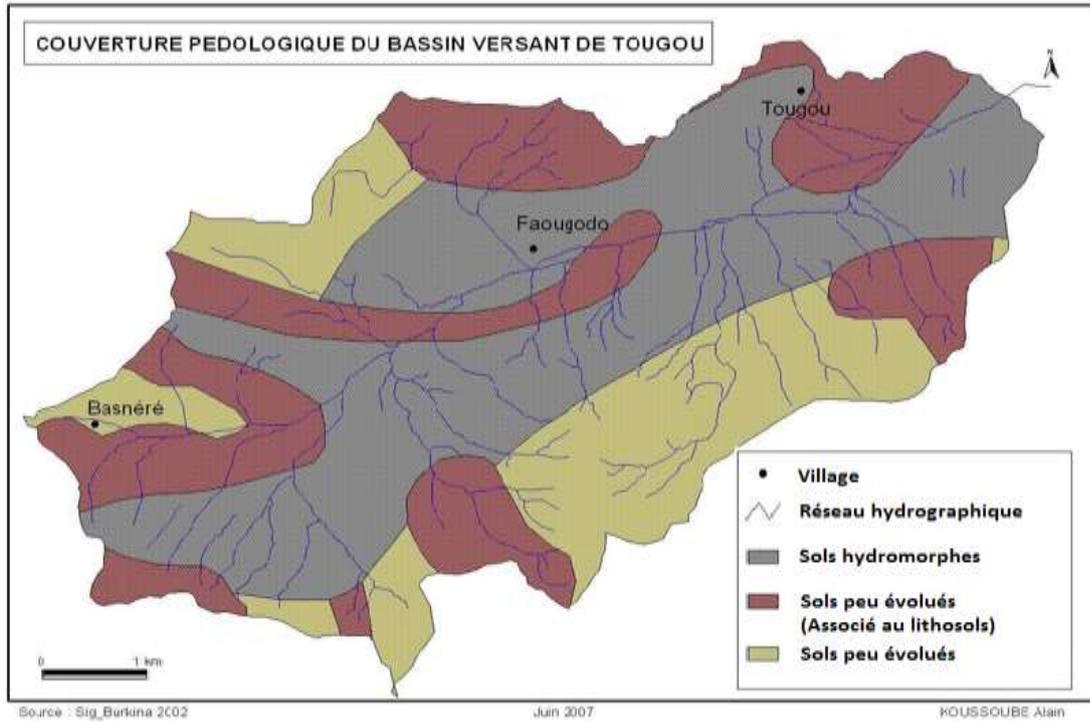
Annexe 2 : Pluies annuelles de Ouahigouya (Direction de la météorologie)

Année	Pluie annuelle	Evapotranspiration	Année	Pluie annuelle	Evapotranspiration
1961	749	2273	1986	590	1962
1962	805	2244	1987	466	2062
1963	819	2099	1988	707	2147
1964	591	2083	1989	612	2195
1965	751	2066	1990	403	2256
1966	660	2022	1991	679	2061
1967	782	2110	1992	713	2037
1968	702	2116	1993	603	2146
1969	610	2135	1994	964	2062
1970	521	2189	1995	613	2179
1971	481	2219	1996	730	2182
1972	501	2134	1997	590	2109
1973	477	2156	1998	671	2135
1974	758	1977	1999	672	2132
1975	583	1891	2000	577	2130
1976	520	1891	2001	733	2110
1977	425	1941	2002	579	2144
1978	775	1848	2003	729	2077
1979	578	2122	2004	596	2229
1980	576	2247	2005	575	2086
1981	836	1961	2006	648	2030
1982	360	1946	2007	936	2015
1983	358	2143	2008	759	2013
1984	391	2076	2009	755	2035

Annexe 3 : Carte du réseau hydrographique



Annexe 4 : Carte représentant les sols



Annexe 5 : Résumé de quelques espèces végétales du site

Annexe 6 : Vue du dispositif expérimental



Annexe 7 : Détermination de la conductivité hydraulique par le logiciel Graph Pad Prism

- ✓ Détermination du taux d'infiltration à partir des mesures prises

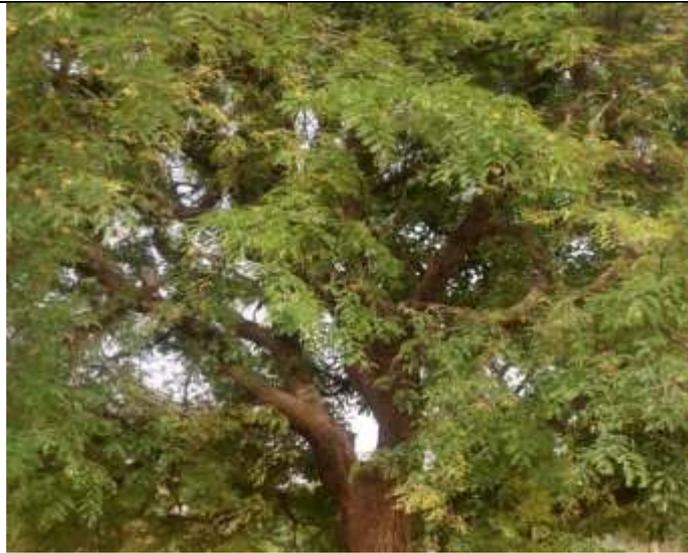


Photo 10: Un tamarinier sur le bassin versant de Tougou

Le tamarinier

Nom scientifique : *Tamarindus indica* est une espèce d'arbres. Son nom plus courant est le **tamarinier**. Elle appartient à la famille des *Fabaceae* et à la sous-famille des *Caesalpinioideae*.

Usages :

Les feuilles fraîches ou sèches, les fleurs, et surtout la pulpe des fruits sont consommées. Le fruit est consommé frais ou séché au soleil, en condiment pour relever les sauces, sert d'aromate pour le thé. Le jus du fruit est une boisson rafraîchissante et fortifiante L'écorce est utilisée contre l'asthme.



Photo 11: Un karité sur le bassin versant de Tougou

Le karité

Nom scientifique : *Vitellaria paradoxa*) est l'unique espèce connue du genre *Vitellaria*, qui appartient à la famille des *Sapotaceae*. Bien qu'il perde de son importance au profit d'autres cultures, le karité est un arbre considéré comme sacré et à ce titre, les autochtones ne conçoivent ni de le couper, ni de le détruire de quelque manière que ce soit. Le karité pousse dans les savanes arborées d'Afrique de l'Ouest (Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée, Nigeria, Bénin, Togo, Sénégal) ainsi qu'au Cameroun, en République du Congo, RDC, au Soudan et en Ouganda.

Usages :

	<p>Les fruits et amandes dont on fait le beurre sont comestibles. Le beurre est une source de lipide nécessaire pour transformer le β carotène en vitamine A. Les chenilles du karité (à ramasser quand elles descendent de l'arbre) sont très riches en protéines (consommées surtout du côté de Bobo Dioulasso). Les racines, l'écorce et les feuilles sont utilisées pour des soins médicaux.</p>
 <p>Photo 12: Une liane sur le bassin versant de Tougou</p>	<p>La Liane goïne</p> <p>Nom scientifique : <i>Saba senegalensis</i> est une espèce de plantes de la famille des <i>Apocynaceae</i>. C'est une espèce de lianes sauvages qui pousse dans les savanes africaines et qui est cultivée comme un arbuste. Son fruit est appelé <i>zaban</i> (en bambara ou dioula), <i>malombo</i> (dans le bassin du Congo), <i>maad</i> (en wolof), <i>made</i> (en français d'Afrique) et <i>wèda</i> (en mooré), ou <i>côcôta</i> (en Côte d'Ivoire).</p> <p>Usages : Les fruits sont plutôt mûrs en saison des pluies mais on en trouve toute l'année. On peut les déguster tels quels ou en préparation (jus). Le fruit est riche en vitamine A (β-carotène), K et C. En pharmacopée, les racines entrent dans les soins de la stérilité féminine. Les feuilles en macération sont utilisées contre les vomissements et les maux de ventre, le latex contre la toux et la tuberculose et les vrilles pour les soins des bébés. Les feuilles et les rameaux entrent dans la composition des teintures.</p>

$$I = \frac{4V}{(dt)\pi D^2}$$

Avec

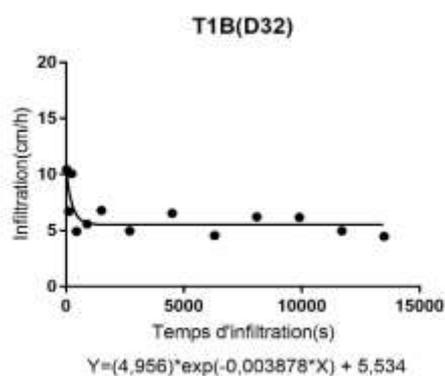
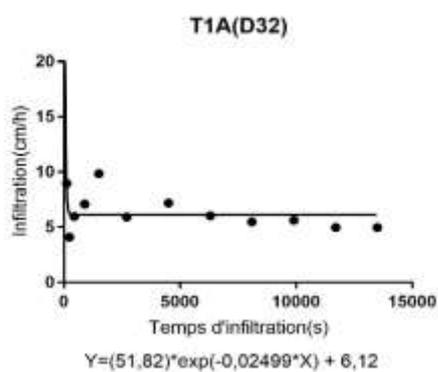
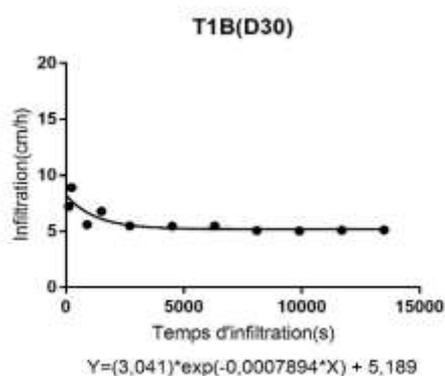
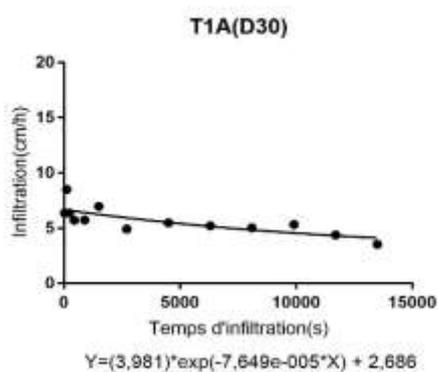
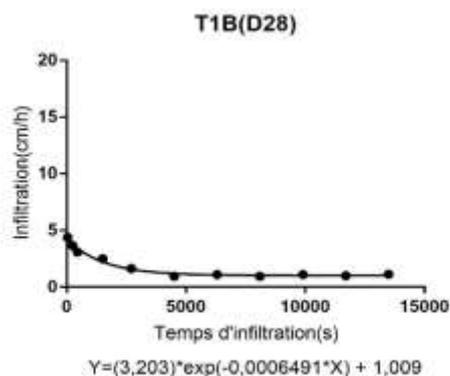
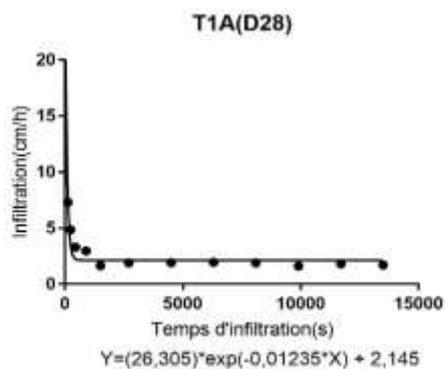
I : Taux d'infiltration (cm/h)

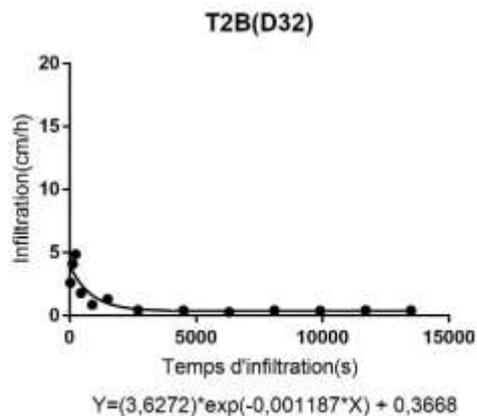
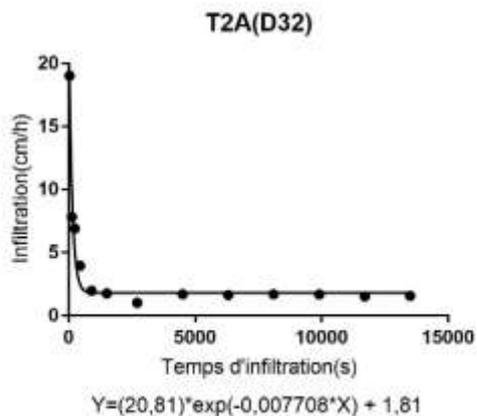
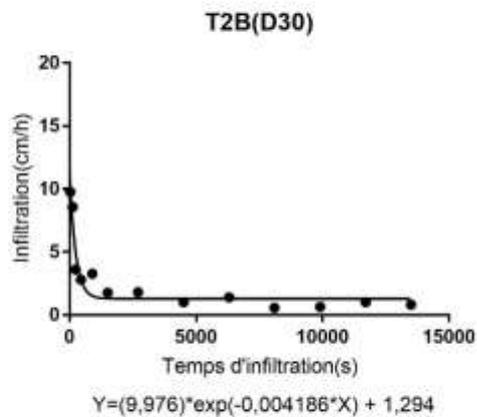
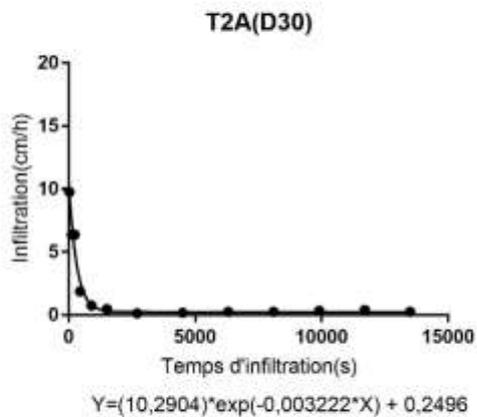
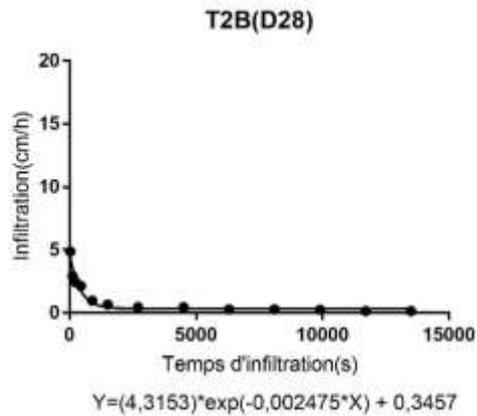
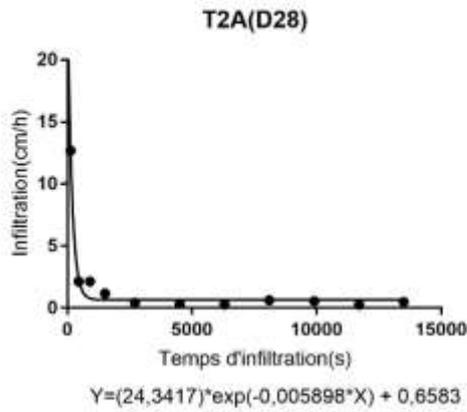
V : Volume d'eau renversé pour maintenir la charge constante (Ml) pour un temps dt

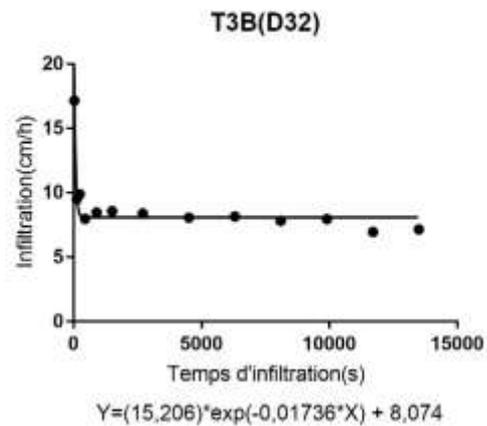
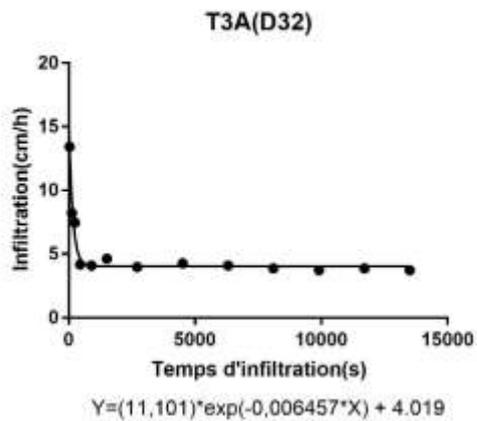
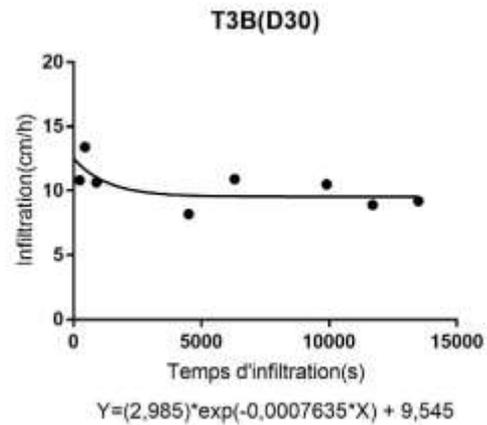
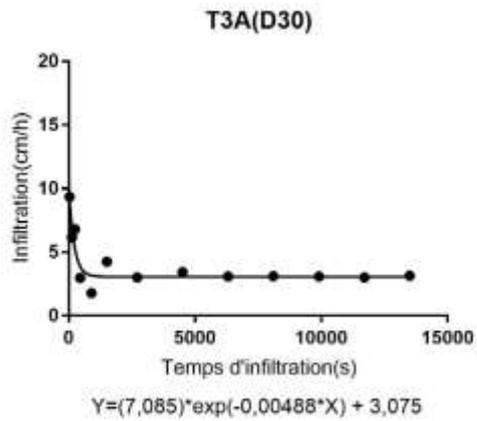
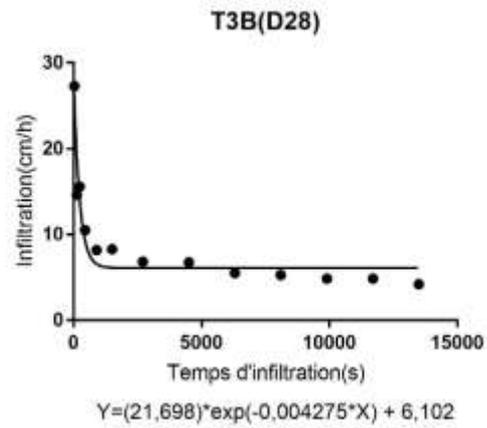
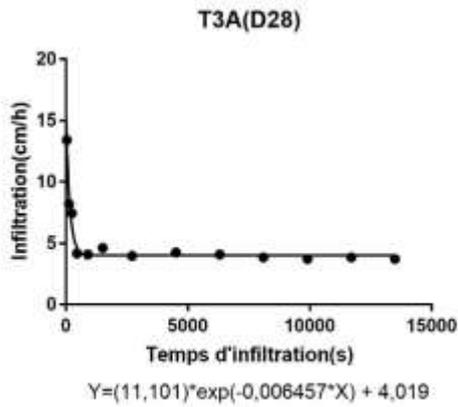
dt : Temps écoulé entre 2 mesures consécutives(s)

D : Diamètre de l'anneau interne

✓ Courbes d'infiltrations des différentes parcelles







✓ Conductivités hydrauliques à saturation sur les différentes pratiques

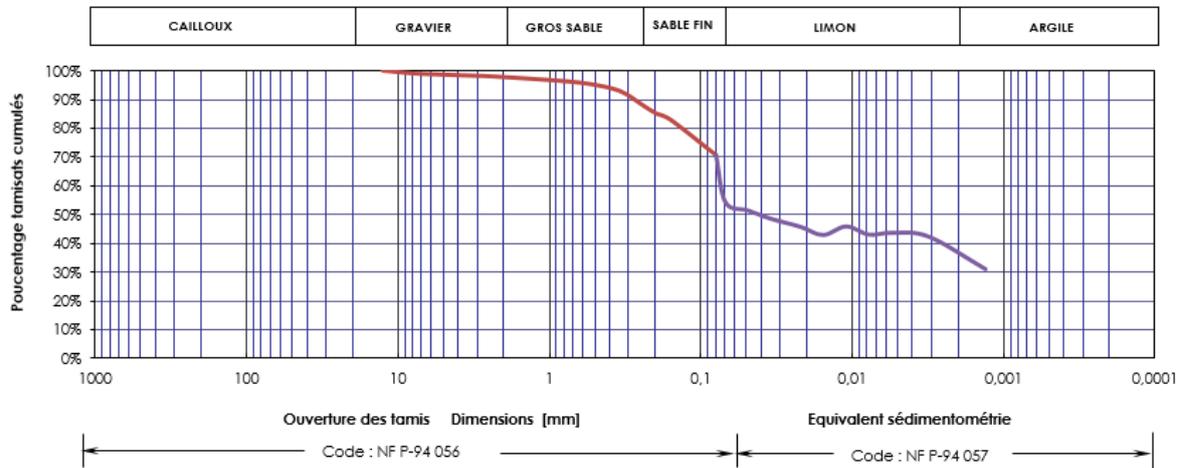
N°	Ksat (cm/h)			
	Témoin	Cordons-pierreux	Zaï	Demi-lune
1	5,834	7,243	8,004	1,649
2	6,993	7,894	5,911	0,8595
3	6,412	6,497	7,672	1,114
4	5,253	6,446	4,019	1,127
5	9,351	6,12	9,045	1,294
6	6,945	7,584	6,386	1,81
7	6,658	5,292	8,698	3,941
8	5,996	3,175	6,102	1,472
9	7,487	5,534	8,074	3,615

Annexe 8 : Coefficients de ruissellement des pratiques

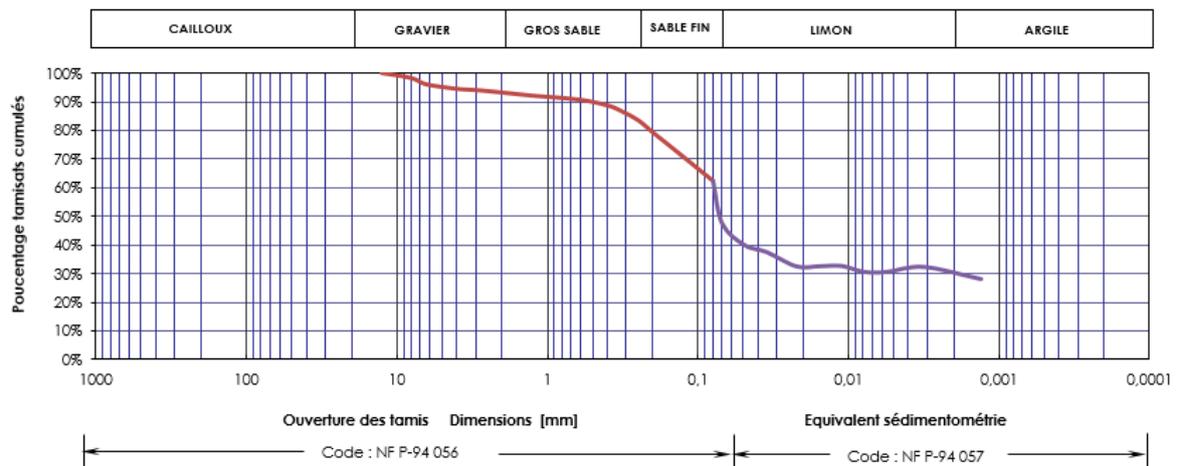
Dates	Pluie	Kr		
		Témoin	Cordon pierreux	Zaï
1/7	13,5	0,32	0,18	0,05
4/7	26,4	0,39	0,22	0,09
11/7	7,5	0,09	0,04	0,00
13/7	22,4	0,46	0,37	0,03
26/7	13,5	0,21	0,05	0,01
2/8	9,8	0,25	0,07	0,01
9/8	16,9	0,34	0,25	0,07
10/8	21,5	0,62	0,46	0,11
21/8	9,6	0,30	0,16	0,05
24/8	11,4	0,25	0,17	0,06
26/8	23,0	0,36	0,27	0,13
31/8	14,3	0,11	0,08	0,01
3/9	15,4	0,44	0,25	0,07
6/9	9,5	0,26	0,12	0,01
11/9	7,6	0,26	0,14	0,01
13/9	7,2	0,34	0,15	0,01
16/9	34,0	0,55	0,38	0,16

Annexe 9 : Courbes d'essai granulométrique

✓ Témoin

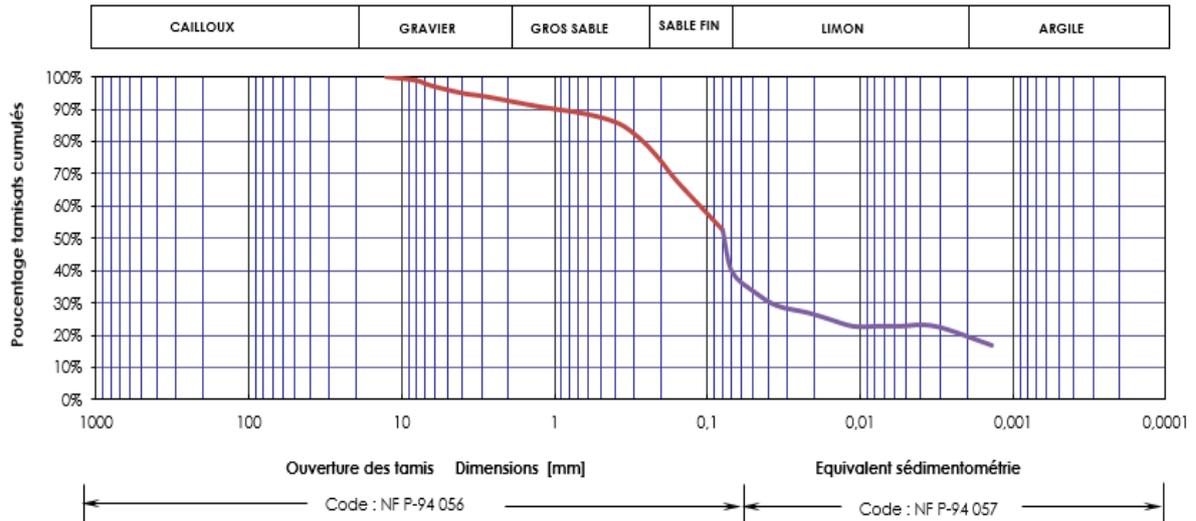


✓ Cordon pierreux

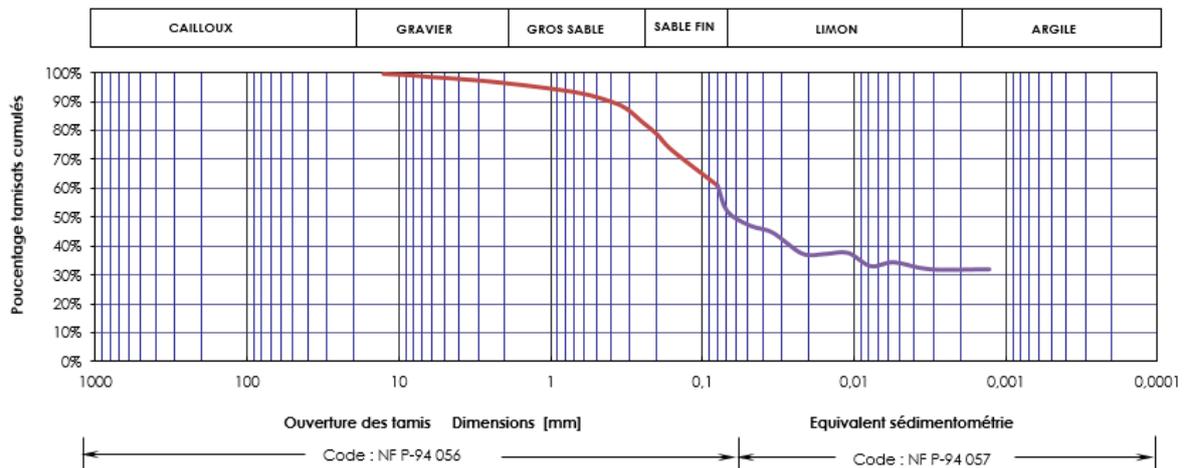


✓ Zai

Effet des pratiques culturales sur le bilan hydrique, la croissance des plantes et le rendement agricole : cas du bassin versant de Tougou



✓ Demi-lune



Annexe 10 : Valeurs moyennes des hauteurs

JAS	Date	Moyenne			
		Témoïn	Zaï	Demi-lune	Cordon pierreux
0	02/07/2017	0	0	0	0
7	09/07/2017	3	7	3	4
14	16/07/2017	6	13	18	7
22	24/07/2017	11	19	22	9
29	31/07/2017	14	30	24	18
36	07/08/2017	18	33	28	18
43	14/08/2017	18	56	42	23
50	21/08/2017	23	69	64	30

Effet des pratiques culturales sur le bilan hydrique, la croissance des plantes et le rendement agricole : cas du bassin versant de Tougou

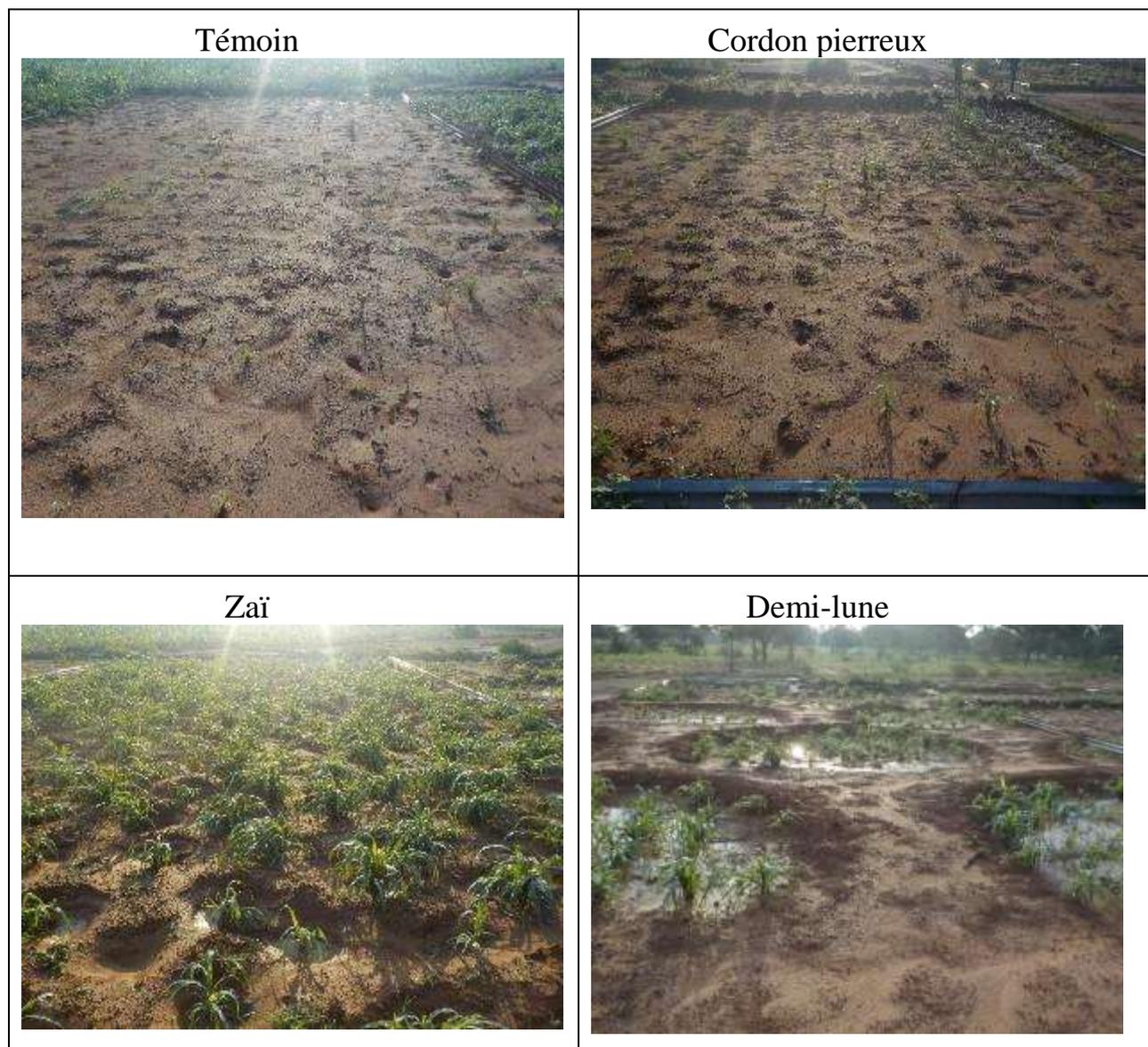
57	28/08/2017	28	103	92	41
64	04/09/2017	49	171	140	72
71	11/09/2017	81	217	194	105
78	18/09/2017	98	237	221	121
85	25/09/2017	111	245	230	139
92	02/10/2017	113	245	230	140
99	09/10/2017	113	245	230	140

Annexe 11 : Evolution du nombre de talles

JAS	Date	Témoin	Zaï	Demi-lune	Cordon pierreux
43	14/08/2017	2	11	5	2
50	21/08/2017	2	10	4	2
57	28/08/2017	3	11	5	4
64	04/09/2017	3	16	8	9
71	11/09/2017	4	13	7	9
78	18/09/2017	5	13	8	5
85	25/09/2017	5	8	8	8
92	02/10/2017	3	7	7	6
99	05/10/2017	3	7	7	6

Annexe 12 : Présentation des plantes à différents stade d'évolution

✓ 10/08



✓ 24/08

Témoin



Cordon pierreux



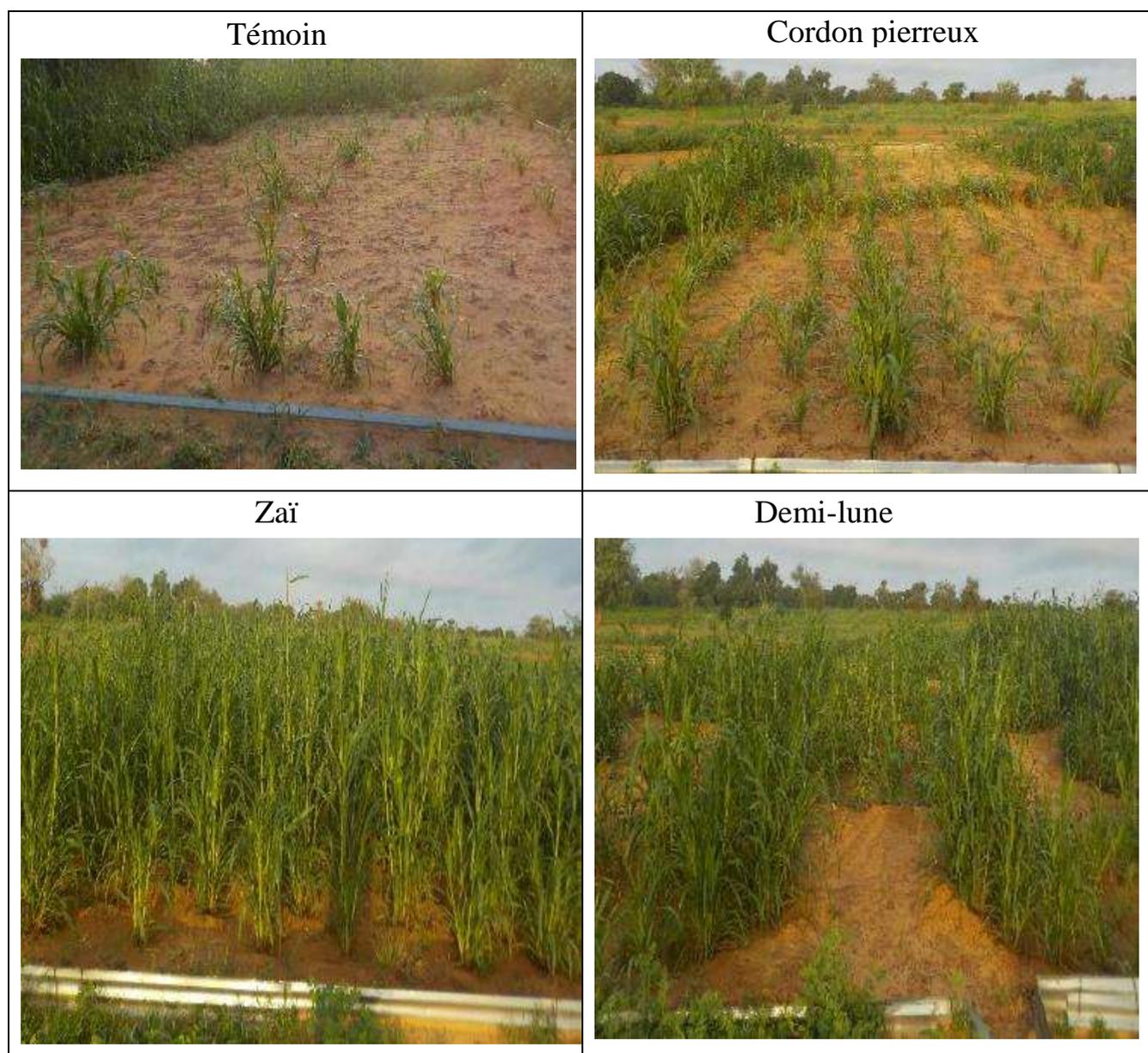
Zaï



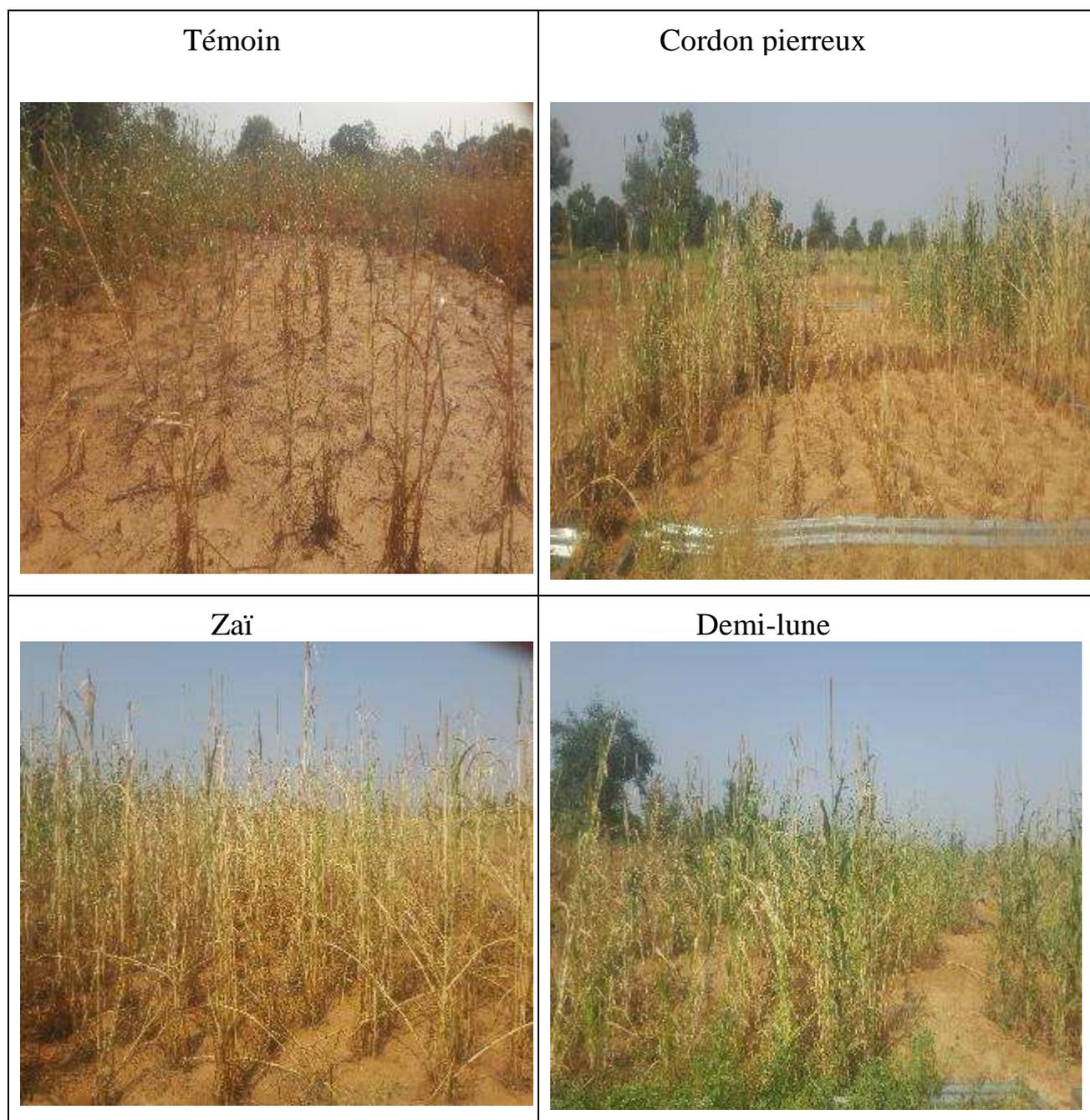
Demi-lune



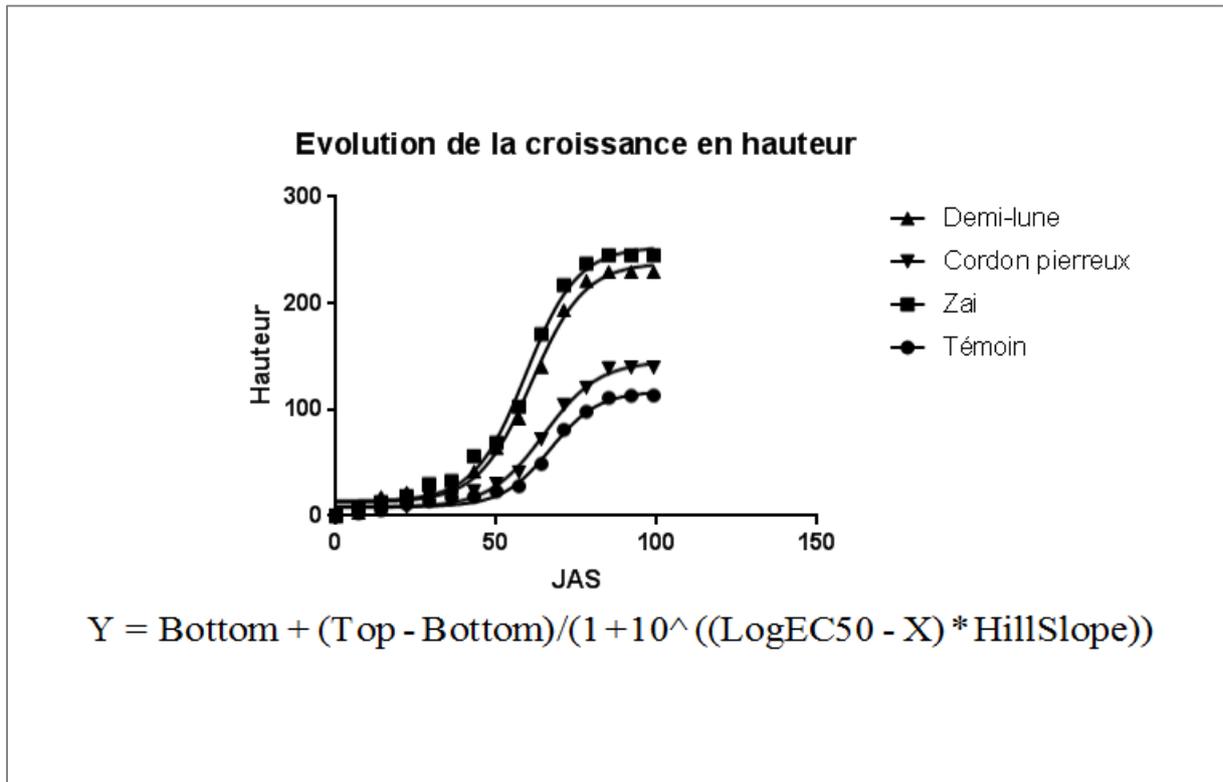
✓ 02/09



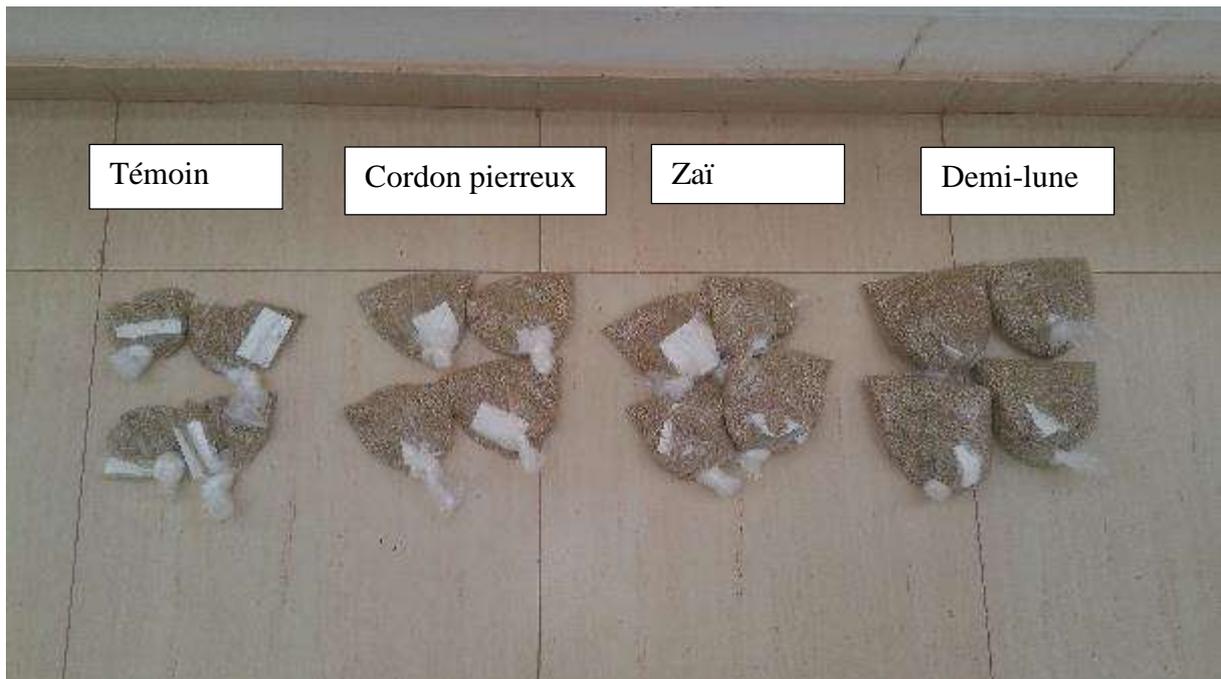
✓ 11/10



Annexe 13 : Evolution de la croissance en hauteur sur GraphPad



Annexe 14 : Photo des rendements



Annexe 15 : Apparition de termites sur les parcelles de zaï



Annexe 16 : Demi-lunes inondées après une pluie de 23 mm (26/08)



