



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN SCIENCE ET TECHNOLOGIE DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : **EAU**

Présentée et soutenue publiquement

par

ZOURE CHEICK OUMAR

le 08 Avril 2019

Réf/2iE|2019-02

**ÉTUDE DES PERFORMANCES HYDROLOGIQUES DES TECHNIQUES
CULTURALES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN
ZONE SAHÉLIENNE DU BURKINA FASO**

JURY

M. Léopold SOME, <i>Directeur de Recherche</i> , INERA, Burkina Faso	Président
M. Expedit VISSIN, <i>Professeur Titulaire</i> , Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin	Rapporteur
M. Didier ORANGE, <i>Directeur de Recherche</i> , IRD, France	Rapporteur
M. Robert ZOUGMORE, <i>Maître de Recherche (CAMES)</i> , ICRISAT, Mali	Examineur
M. David CONSUEGRA, <i>Professeur Titulaire</i> , HEIG-VD, Suisse	Examineur
M. Harouna KARAMBIRI, <i>Professeur Titulaire</i> , Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de Thèse
M. Pierre QUELOZ, <i>Docteur</i> , HEIG-VD, Suisse	Invité

Laboratoire Eaux, HydroSystèmes et Agriculture (LEHSA)

DÉDICACE

À

Mon père Moumini Zouré, ma mère Opportune Marie Claire Zongo, mon épouse Inès Noaga
Gwladys Ouédraogo et à mes enfants Imen et Amir

Je dédie affectueusement ma thèse

REMERCIEMENTS

Après quatre années de recherche scientifique ayant abouti à l'élaboration de cette thèse, c'est avec un grand plaisir que je voudrais adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui ont été d'un grand soutien pour la réalisation de cette étude. Avant tout propos, je suis reconnaissant envers l'Institut 2iE à travers son Directeur Général qui m'a octroyé une allocation de recherche durant ces travaux de thèse. Grand merci à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD, Suisse) pour m'avoir accepté en mobilité au sein du département Environnement Construit et Géoinformation (EC+G). Cette thèse a été financée entièrement par la Direction de Développement et de Coopération Suisse (DDC).

Je tiens en tout premier lieu à remercier mon Directeur de thèse, le Professeur Harouna KARAMBIRI qui m'a fait confiance en acceptant la direction de ce travail et en mettant à ma disposition tous les moyens financiers et humains pour la réussite et le bon déroulement de cette thèse. Durant ces quatre longues années de thèse, il a été disponible, il m'a procuré des conseils, il m'a enseigné la rigueur scientifique, la démarche méthodologique et l'analyse critique. Je ne saurais trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude, mais qu'il trouve à travers ce document l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je remercie également le Professeur Hamma YACOUBA, Secrétaire Général de l'Institut 2iE pour m'avoir aidé à mieux aborder la partie agronomie de ce travail.

Aussi, je tiens à remercier le Professeur David CONSUEGRA de la HEIG-VD (Suisse) pour m'avoir accueilli au sein de son département EC+G pour l'élaboration du modèle hydrologique utilisée dans ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour sa grande personnalité et pour sa contribution significative à l'atteinte des objectifs de ce travail. Merci d'avoir accepté d'être l'un des examinateurs de cette thèse.

Je tiens à remercier les membres du jury. Monsieur Léopold SOME, Directeur de Recherche à l'INERA (Burkina Faso) qui m'a fait honneur de présider le jury de cette thèse. Messieurs Expedit VISSIN, Professeur à l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) et Didier ORANGE, Directeur de Recherche à l'IRD (France), m'ont fait le plaisir d'accepter de rapporter cette thèse. Toute ma gratitude s'adresse à Monsieur Robert ZOUGMORE, Maître de Recherche à l'ICRISAT (Mali), qui a accepté d'être l'un des examinateurs de cette thèse. Je leur suis reconnaissant d'avoir apporté des commentaires pertinents sur mon travail.

Je remercie le Dr. Pierre QUELOZ collaborateur scientifique à la HEIG-VD qui a énormément contribué à la réalisation de cette thèse. Je salue la clairvoyance de ses opinions scientifiques et son regard très critique sur la méthodologie et la discussion des résultats obtenus dans ce travail. Il a été disponible tout au long de la thèse pour m'aider à élaborer le modèle hydrologique, à traiter les données et à interpréter les résultats obtenus. Aussi, il m'a formé à la rédaction scientifique, il m'a supporté, encouragé et conseillé pendant les moments difficiles de cette thèse. Je voudrai qu'il trouve dans ces lignes ma profonde reconnaissance à l'endroit de cette collaboration qui a été très fructueuse. Merci d'être membre de mon jury de thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à mes encadreurs de 2iE. Leurs suivis et avis ont été très utiles pour la bonne conduite de mes travaux de thèse. Dr. Dial NIANG, Prof. Mahamadou KOITA, et Dr. Adjadi Mounirou LAWANI ont aidé à la mise en place du protocole expérimental et aux traitements des données. Ils m'ont enseigné, prodigué des conseils et des encouragements. Dr. FOWE TAZEN m'a apporté des critiques constructives tant sur les travaux de terrain que sur les différentes rédactions de documents. Il s'est vraiment investi en apportant des corrections pour la bonne compréhension du document de thèse. Dr. Amadou KEITA a été d'un grand apport sur l'analyse statistique et à plusieurs fois apporter des recommandations constructives pour la bonne compréhension des documents issues de cette thèse.

Ma thèse n'aurait pas été si enrichissante sans la convivialité et l'assistance de mes collègues doctorants de 2iE. Je pense essentiellement à Roland qui m'a beaucoup aidé dans le traitement de données et la relecture de mes documents. Radegonde qui m'a aidé dans la collecte des données pendant les événements pluvieux. Merci aux doctorants Bouraïma, Gnenakantanhan, Moussa, Arnaud, Mougabé, Richard, Césaire, Axel, Patrick, Gaëlle, Lea Titia et Gloria pour avoir rendu ces quatre années agréables et enrichissantes. Merci à mon observateur de terrain, Mathieu pour m'avoir aidé à installer le dispositif expérimental et à collecter les données. Merci également à Ariane, Assistante de l'école doctorale pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Je remercie du fond du cœur mon père et ma mère pour leurs bénédictions et encouragements. Merci également à mes grandes familles ZOURE/ZONGO et à mes beaux-parents papa Raphaël et maman Valentine OUEDRAOGO pour leur amour et leur soutien inconditionnel. Un grand merci à Josiane, Souleymane, Ousmane, Olivia, Sonia, Oswald et Yves pour leur esprit de solidarité. Mes vives pensées vont à l'endroit de mon épouse Inès Gwladys qui m'a toujours soutenu et encouragé durant ces quatre années. Tu as une part très importante dans cette Thèse. Trouve ici l'expression de ma profonde gratitude. Enfin, que tous ceux qui m'ont aidé par leur assistance trouvent ici mes sincères remerciements.

Merci à tous et à toutes

RÉSUMÉ

Le Sahel est l'une des régions du monde les plus vulnérables à cause des perturbations climatiques et de la pression anthropique. Cela entraîne la dégradation des terres et affecte négativement les activités de production agricole de type pluviale, principale source de subsistance et d'économie des populations du Sahel. Depuis les années 1980, les paysans ont adopté des pratiques innovantes afin de faire face à ces défis majeurs et ainsi améliorer la production agricole. Si à ce jour, les avantages en termes de rendement agricole et de réhabilitation de terres dégradées ont pu être mis en évidence, l'impact de ces techniques sur les processus hydrologiques reste peu maîtrisé et non quantifié. Cette étude menée au Sahel Burkinabè a pour objectif d'évaluer les performances hydrologiques des techniques de conservation des eaux et des sols (CES) installées sur un sol dégradé afin d'identifier des technologies plus résilientes face à la précarité climatique.

L'approche méthodologique est détaillée en 3 parties. En premier lieu, il s'agit de déterminer les propriétés hydrodynamiques et l'aptitude au ruissellement d'un sol dégradé aménagé avec les techniques CES. Ainsi, il a été conçu un dispositif expérimental de type bloc de Fisher avec 4 traitements et 2 répétitions mise en place sur des parcelles de 200m². Les traitements étaient composés de zaï, de demi-lune, de cordon pierreux et de semis direct servant de témoin. Le dispositif a permis le suivi hydrométéorologique durant 3 années consécutives (2015, 2016 et 2017). En second lieu un modèle conceptuel basé sur la méthode SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) permettant de prendre en compte l'effet de stockage superficiel induit par les différentes techniques a été développé pour étudier les effets des techniques sur le stockage en eau du sol sous différents régimes climatiques. Enfin les données climatiques historiques (1961-2005) et projetées (2006-2099) issues de 25 modèles climatiques corrigées dans le cadre du projet AMMA-2050 ont été comparées avec les observations pour le choix des modèles qui simulent au mieux le climat. Les données de 3 modèles climatiques ont été ainsi utilisées pour étudier la performance hydrologique des techniques CES et proposer des technologies plus résilientes face au climat actuel et futur.

Les résultats montrent des caractéristiques bien différenciées entre les pratiques culturelles après 3 années de mise en œuvre. Les techniques CES modifient les propriétés hydrauliques de surface du sol. La conductivité hydraulique à saturation a augmenté sur les parcelles de zaï ($7,1 \pm 1,4$ cm/h), par rapport aux parcelles témoins et aux cordons pierreux où les conductivités n'ont pas changé de manière significative ($4,7 \pm 0,3$ et $3,8 \pm 0,8$ cm/h respectivement). En revanche, elle a fortement diminué sur la demi-lune ($1,2 \pm 0,4$ cm/h). Les techniques CES ont montré leurs performances à réduire le ruissellement et à augmenter le stock d'eau dans le sol,

ce qui améliorerait la satisfaction des besoins hydriques des plants. En effet, les valeurs cumulées de ruissellement ont été réduites de 25%, 50% et 95% respectivement par le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune comparativement à la parcelle témoin. Le ruissellement s'est révélé très faible sur les parcelles de demi-lunes pour les évènements pluvieux inférieurs à 50 mm. Le modèle développé a reproduit avec une précision satisfaisante le ruissellement observé (R^2 entre 0.73 et 0.95) et a permis de simuler la variabilité du stockage sur le long terme (1961-2009) de l'eau pour chaque technique en réponse à divers régimes de précipitations. Il apparaît que le zaï et les demi-lunes peuvent atténuer l'effet des périodes de sécheresse en conservant l'humidité du sol pendant 2 à 3 semaines, alors que le semis direct et le cordon pierreux montrent un déficit hydrique important après une semaine. Sur la base de l'analyse du climat observé, il ressort que le zaï de diamètre 40 cm, espacements 80x80 cm, profondeur 10 cm aurait permis d'assurer les besoins hydriques du mil 9 années sur 10 tout en garantissant une production agricole bien supérieure à celle obtenue avec le semis direct. À l'avenir, le zaï proposé apparaît être en mesure d'atténuer les sécheresses pluviométriques d'ici à l'horizon 2050 avec une assurance de satisfaction hydrique de 7 années sur 10. Toutefois, durant la période 2051-2099, le zaï proposé ne serait plus satisfaisant pour atténuer les sécheresses extrêmes, car la satisfaction hydrique des plants est estimée à 3 années sur 10. Des mesures d'adaptation plus efficaces devront être mises en place pour permettre aux producteurs agricoles d'être plus résilients face aux changements climatiques.

Mots clés : Techniques de conservation des eaux et des sols ; Tougou ; Sahel ; Modèle SCS-CN ; Bilan hydrologique ; Changements climatiques.

ABSTRACT

The Sahel is one of the most vulnerable regions in the world, strongly affected by climate disturbances and anthropogenic pressure. This leads to soil degradation and negatively affect the livelihood and economy of the sahelian population, which are largely based on rain-fed agriculture. As a result, the population has widely adopted innovative farming practices to improve crop production since 1980s. Despite the associated benefits in terms of crop production and soil rehabilitation, impacts of these farming practices on hydrological processes still remain poorly studied.

The current study, conducted in the sahelian part of Burkina Faso aimed at evaluating the hydrological performance of the water harvesting techniques implemented on degraded soil to propose more resilient farming practices against climate variability.

The methodological approach is divided in 3 main steps. Firstly, the hydrodynamic properties and runoff response of water harvesting techniques implemented on a degraded soil were experimentally determined. The experimental setup consisted of two replicates of a complete Fisher block, with each block being composed of four identical plots of 200 m² implemented with zaï, half-moon, stone row and direct seeding (as control). Hydrometeorological monitoring was carried out on the experimental setup for 3 consecutive years (2015, 2016 and 2017). Secondly, a conceptual model, based on the SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) method was developed, including some modifications to account for the soil surface storage effect induced by the different techniques. The new model was then used to study the effects of water harvesting techniques on soil water storage under various rainfall and climate patterns. Lastly, historical (1961-2005) and projected (2006-2099) climate data derived from 25 climates models corrected through the AMMA-2050 project were compared with observed data to find the best models which simulate climate. Thus, data from 3 climate models were used to study the resilience of farming practices in order to identify suitable technology against actual and future climate.

The results clearly showed different hydrological performances between farming practices after 3 years of operation. The water harvesting techniques significantly modified soil surface hydraulic properties. Comparatively, saturated hydraulic conductivity increased on zaï plots (7.1 cm/h), relative to that of the control and stone row plots with a slight variation of 4.7 and 3.8 cm/h respectively. In contrast, saturated hydraulic conductivity on half-moons considerably decreased to a minimum of 1.2 cm/h. These farming practices proved their performance at

reducing runoff and increasing soil water storage to support plant water demand. They allowed a runoff reduction by 24-39%, 50-56% and 95-97%, respectively, on stone row, zaï and half-moon plots as compared to the control. Runoff was found to be very low on half-moon plots for rainfall events below 50 mm. The developed model reproduced satisfactory observed runoff values ($R^2=0.73-0.95$) and gave over the long term (1961-2009) a clear insight of the variability of the water storage for each technique in response to the rainfall pattern. It appears in particular that, zaï and half-moons are able to mitigate the effect of dry spells by sustaining available water for crops over extended periods up to three weeks, whereas the direct seeding and stone row techniques rapidly leads to plant water deficit after a dry spell of one week.

Regarding climate projections, on the basis of observed climate analysis, it appears that zaï with design characteristics of 40 cm diameter, 80x80 cm spacing, 10 cm depth would have helped ensure the millet's water demand for 9 years out of 10 with a satisfactory crop yield. Future projection thus revealed that, the periods between 2006 and 2050, will have the zaï been adequate to support millet water demand for 7 years out of 10 the years. However, the period 2051 to 2099, will have the water demand been sustained for 3 years out of 10 in which agricultural yield could be affected. For greater resilience of farmers to climate change, more effective adaptation measures need to be implemented.

Keywords: Water harvesting techniques; Tougou; Sahel; SCS-CN model; Water balance; Climate change.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIERES	viii
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS	xii
Introduction générale.....	1
1. Contexte et problématique de l'étude	1
2. Justification et objectifs de l'étude	3
3. Méthodologie de l'étude	5
4. Structuration de la thèse	6
Chapitre 1 : Défis du secteur agricole face aux perturbations environnementales en zone sahélienne	8
1. Introduction	8
2. Importance de l'agriculture pour les pays sahéliens.....	8
3. États des connaissances sur les perturbations environnementales au Sahel.....	10
3.1. Variabilités et changements climatiques au Sahel	10
3.2. Pression démographique	13
3.3. Dégradation des sols	13
4. Conséquence des changements environnementaux sur l'hydrologie et l'agriculture.....	15
5. Stratégies d'adaptation des paysans sahéliens.....	17
5.1. Adoption des techniques de conservation des eaux et des sols	17
5.1.1. Les techniques de conservation des eaux et des sols au Sahel.....	18
5.1.2. Impacts des techniques de conservation des eaux et des sols sur la productivité agricole et la performance hydrologique.....	29
5.1.3. Impacts des techniques de conservation des eaux et des sols sur les propriétés du sol	31
5.1.4. Conditions pour la mise en œuvre des techniques de conservation des eaux et des sols.....	31
5.2. Adaptation variétale : Cas du mil (<i>Pennisetum glaucum</i>)	34
6. Conclusion partielle.....	35

Chapitre 2 : Zone d'étude, site expérimental et protocole de mesure 36

1. Introduction	36
2. Cadre naturel et physique	36
2.1. Localisation du bassin versant de Tougou	36
2.2. Climat et hydrographie	37
2.3. Géologie et géomorphologie	40
2.4. Sols et végétation	40
3. Cadre humain et socio-économiques	41
3.1. Population de Tougou	41
3.2. Activités économiques	42
4. Justification du choix de la zone d'étude.....	43
4.1. Tougou : Observatoire expérimental sur l'eau, le climat et l'environnement	43
4.2. Vulnérabilité, perception paysanne des changements climatiques et stratégies d'adaptations des agriculteurs.....	44
5. Site expérimental	45
5.1. Dispositif expérimental	46
5.2. Protocole expérimental	51
6. Conclusion partielle	54

Chapitre 3 : Evaluation des performances hydrologiques des différentes techniques culturales..... 56

1. Introduction	56
2. Matériels et méthodes	57
2.1. Détermination de la lame d'eau ruisselée sur la parcelle.....	57
2.2. Calcul de l'évapotranspiration	57
2.3. Evaluation des propriétés hydrodynamiques du sol.....	58
2.3.1. La conductivité hydraulique à saturation du sol.....	58
2.3.2. La conductivité hydraulique non saturée, la sorptivité et la taille moyenne des pores actifs des sols	60
2.4. Détermination de l'humidité et de la charge de pression du sol	62
2.5. Estimation de la lame d'eau drainée à 1 m de profondeur.....	62
2.6. Analyse statistique des données	63
3. Résultats et discussion	64
3.1. Effet des pratiques agricoles sur le ruissellement	64
3.1.1. Caractéristiques des précipitations sur les parcelles expérimentales	64
3.1.2. Etude du ruissellement sur les différentes techniques agricoles	66
3.2. Effet des pratiques agricoles sur les propriétés hydrauliques de surface du sol	71
3.3. Effet des pratiques agricoles sur l'humidité et la charge de pression du sol	79

3.3.1. Evolution temporelle de l'humidité volumique	79
3.3.2. Profils d'humidité du sol	81
3.3.3. Evolution temporelle de la charge de pression.....	82
4. Conclusion partielle	85
Chapitre 4 : Elaboration d'un outil de simulation de l'impact des techniques agricoles sur le stockage en eau du sol	86
1. Introduction	86
2. Généralité sur la modélisation hydrologique	87
2.1. Types de modèles hydrologiques	87
2.2. Échelle spatiale et temporelle des modèles.....	89
2.3. Fonctions utilisées dans les différents modèles	89
3. Matériels et méthodes	92
3.1. Choix d'un modèle hydrologique	92
3.2. Description du modèle SCS-CN	92
3.3. Modification du modèle SCS-CN pour la simulation continue du bilan hydrologique du sol.....	94
3.4. Evaluation des performances agronomiques des pratiques agricoles	99
3.5. Calage et validation du modèle hydrologique	99
3.6. Évaluation des performances du modèle	100
4. Résultats et discussions	101
4.1. Performance du modèle hydrologique à simuler le ruissellement	101
4.2. Analyse de sensibilité du modèle SCS-CN modifié	105
4.3. Effets des techniques sur le stockage en eau du sol et l'atténuation des poches de sécheresse.....	107
4.4. Effets des techniques sur la production agricole.....	114
5. Conclusion partielle	118
Chapitre 5 : Étude des performances hydrologiques des techniques agricoles sur le long terme et optimisation du zaï	119
1. Introduction	119
2. Matériels et méthodes	120
2.1. Données climatiques pour la simulation des performances hydrologiques des techniques culturales	120
2.2. Définition des indicateurs de sécheresses	120
2.2.1. Indicateurs de sécheresse pluviométrique	121
2.2.2. Indicateurs de sécheresses agronomiques	123
2.3. Formulation mathématique de l'optimisation de la géométrie du zaï.....	123
3. Résultats et discussions	127

3.1. Analyse des performances hydrologiques des techniques sur la base du climat historique.....	127
3.1.1. Indicateurs de sécheresse pluviométrique	127
3.1.2. Aptitude des techniques à atténuer les poches sèches pluviométriques.....	129
3.1.3. Performances hydrologiques des pratiques agricoles.....	133
3.2. Analyse de l'optimisation de la géométrie du zaï	135
4. Conclusion partielle.....	141
Chapitre 6 : Étude de la performance du zaï dans un contexte de changement climatique	142
1. Introduction	142
2. Matériels et méthodes.....	143
2.1. Choix des modèles climatiques.....	143
2.2. Evaluation de l'évapotranspiration potentielle	145
2.3. Cadre d'analyse des scénarios de changement climatique	146
3. Résultats et discussions	147
3.1. Variabilité des pluies moyennes mensuelles.....	147
3.2. Fréquence d'occurrence des poches sèches	148
3.3. Variabilité de l'évapotranspiration moyenne mensuelle.....	149
3.4. Tendance des précipitations et des longues poches sèches.....	151
3.5. Analyse de l'évapotranspiration projetée.....	154
3.6. Performance du zaï face au climat futur	156
4. Conclusion partielle.....	160
Conclusion générale et perspectives	161
Références bibliographiques	165
Liste des Figures	180
Liste des Tableaux.....	183
Annexes.....	184

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

AMMA-2050 :	African Monsoon Multidisciplinary Analysis 2050
ANM :	Agence Nationale de la Météorologie
BAD :	Banque Africaine de Développement
BUNASOL :	Bureau National des Sols
CES :	Techniques de Conservation des Eaux et des Sols
CES/DRS :	Techniques de Conservation des Eaux et des Sols et de Défense et Restauration des Sols
CILSS :	Comité inter-Etat de lutte contre la sécheresse au Sahel
CRDI :	Centre de Recherche pour le Développement International
CORDEX :	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
CMIP5 :	Coupled Model Intercomparaison Project Phase 5
DDC :	Direction de développement et de coopération Suisse
DES :	Croûte de dessiccation
DEC :	Croûte de décantation
ESGF :	Earth System Grid Federation
EC+G :	Environnement Construit et Géoinformation
ENSEMBLE :	ENSEMBLE-Based Predictions of Climate Changes and their Impacts
ET0 :	Evapotranspiration de référence
ETc :	Evapotranspiration culturale
ERO :	croûte d'érosion
GTZ :	Agence Allemande de coopération internationale
GRAV :	croûte gravillonnaire
GES :	Gaz à Effet de Serre
HEIG-VD :	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
HRU :	Hydrologic Response Unit
IDH :	Indice de Développement Humain
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
INERA :	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
INSD :	Institut National de la Statistique et de la Démographie
Institut 2iE :	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ICRISAT :	Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides
IPS :	Indice de Précipitation Standardisé
IWACO :	International Water Consultants
JAS :	Jours Après Semis
JAICAF :	Japan Association for International Collaboration of Agriculture and Forestry
LEAH :	Laboratoire d'Hydrologie et Ressource en Eau (réformé LEHSA)
LEHSA	Laboratoire Eau, HydroSystèmes et Agriculture
MAHRH :	Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques
MERH	Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques
MAS :	Malnutrition Aiguë Sévère
MCG :	Modèle Climatique Global

MCR :	Modèle Climatique Régional
NARCCAP :	North American Regional Climate Change Assessment Program
NPK :	Azote, Phosphore et Potassium
OMM :	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONU :	Organisation des Nations Unies
ONG :	Organisation non gouvernementale
PRUDENCE :	Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects
PDRT :	Projet de Développement Rural de Tahoua
PATECORE :	Projet d'Aménagement des Terroirs et de Conservation des Ressources dans le Plateau central
PIB :	Produit Intérieur Brut
RUI :	croûte de Ruissellement
RNA :	Régénération Naturelle Assistée
RCP :	Representative Concentration Pathways
SCS-CN :	Soil Conservation Service Curve Number
STRU :	Croûte Structurale
TDR :	Time Domain Reflectometry
UN-OCHA :	United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
KINEROS :	A Kinematic Runoff and Erosion Model
WOCAT :	World Overview of Conservation Approaches and Technologies
3^E :	Programme Eau, Environnement, Energie

Introduction générale

1. Contexte et problématique de l'étude

L'an 2015 a été déclaré comme Année Internationale des Sols par l'Organisation des Nations Unies (ONU) car reconnaissant que les sols constituent la base du développement agricole, des services écosystémiques essentiels et de la sécurité alimentaire (Rojas and Caon, 2016). À l'instar des autres régions du monde, les questions sur l'environnement (particulièrement les sols) au Sahel sont d'un enjeu majeur. Dans ce milieu fragile et vulnérable en proie à une dégradation des ressources naturelles (Karambiri, 2003), les sols garantissent la production alimentaire pour les populations et le cheptel, protègent les ressources en eaux et assurent la croissance de la végétation. Malheureusement, depuis plusieurs décennies, la situation écologique s'est nettement dégradée dans les pays du Sahel ouest-africain (Duponnois et Dia, 2013).

Cette dégradation se manifeste par une baisse de la fertilité des sols, une érosion importante, une réduction des réserves en eau des sols, un encroûtement et enfin par la production d'aérosols (Casenave et Valentin, 1989; Serpantié et al., 1992). La réduction du couvert végétal dénude à terme les sols et les expose aux événements de pluies, souvent violents, favorisant ainsi un ruissellement diffus intense. Les effets de précipitations sur les sols sont à l'origine des croûtes qui limitent la capacité d'infiltration des sols et empêchent l'accumulation en profondeur de réserves hydriques utilisables par la végétation qui, par conséquent, se rétracte de plus en plus, laissant apparaître des plages de sols nus et érodés de plus en plus étendues et favorable au ruissellement (Marchal, 1983; Casenave et Valentin, 1989; Claude et al., 1991; Mahé et Paturel, 2009; Maisharou et al., 2015). Cette dégradation des sols a provoqué une modification du cycle de l'eau. Les versants sont devenus des zones de transit pour les flux hydriques superficiels et les zones basses des surfaces d'accumulations (Rajot et al., 2009). Il apparaît ainsi un déséquilibre dans la distribution spatiale de l'eau à l'échelle du paysage faisant ainsi de la dégradation des sols un grave problème entravant le développement durable des pays du Sahel.

Les perturbations à la fois climatiques et anthropiques contribuent à la dégradation du milieu naturel sahélien, avec pour conséquence l'aridification des sols liée essentiellement à la modification des états de surface (Claude et al., 1991). En réalité, le Sahel a subi des effets néfastes du dérèglement climatique. Ce dérèglement climatique s'est traduit par la diminution à long terme des précipitations (1968-1995), de graves épisodes de sécheresses (1972-1973, 1980-1985, 2009-2011) et par une variabilité accrue des précipitations annuelles (Lebel and

Ali, 2009; Ibrahim, 2012; Descroix et al., 2015). Les déficits pluviométriques alors enregistrés au cours de cette période sont de l'ordre de 20 à 40 % (Ali et Lebel, 2009; Mara, 2010). Le Sahel a également connu une augmentation continue et significative des températures du reste très élevées atteignant 40°C (Bambara et al., 2018). Le rapport de l'IPCC (2013) montrent que la température a déjà augmenté de 1,5°C en Afrique sur la période 1910-2010 et augmentera sur une plage probable de 2,6° à 4,8°C d'ici 2100 dans la zone sahélienne.

La caractérisation des événements extrêmes en Afrique de l'Ouest Sahélienne d'ici 2100, montre une probabilité d'occurrence des sécheresses de l'ordre de 66% et une forte occurrence des vagues de chaleurs et des inondations pouvant aller jusqu'à 90% (IPCC, 2013). L'analyse des indices climatiques tels que le cumul maximal quotidien de précipitation, le 99ème percentile de précipitations et la durée maximale des séquences sèches, montre une augmentation de ces événements dans la partie ouest du Sahel (Sarr et Camara, 2017). Le climat futur est donc sujet à une forte variabilité pluviométrique qui conditionne fortuitement le développement d'événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses agronomiques. Selon Griggs et Noguer (2002) les indices des fortes variabilités pluviométriques (longues poches de sécheresses, débuts des pluies tardifs et fin de pluies précoces, pluies de fortes intensités) devraient devenir plus fréquents avec le réchauffement climatique. Ibrahim (2012) montre qu'en zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, l'évapotranspiration potentielle (ETP) annuelle a connu une augmentation moyenne de 5% de 1961-2000 et persistera ainsi jusqu'en 2050. Ces changements observés ont un impact négatif sur l'agriculture, l'élevage et les ressources naturelles (Barké et Salifou, 2015) qui sont des secteurs sur lesquels repose l'essentiel des économies ouest-africaines. L'agriculture est le secteur le plus sensible à la péjoration climatique, car étant essentiellement pluviale. Ces dérèglements du climat pourraient conditionner des baisses de plus de 50% de la production céréalière dans la zone Sahélienne (IPCC, 2013).

En plus de la précarité du climat actuel et futur, le Sahel connaît une forte croissance démographique (taux d'accroissement d'environ 3% par an) depuis le début de la décennie 1990 (Duponnois et Dia, 2013). Cet accroissement démographique entraîne une modification profonde des modes de gestion et d'utilisation des ressources naturelles (Roose, 1994). Selon Ichaou (2000), plus de 80 % des terres sont directement influencées par les activités anthropiques telles que l'exploitation abusive du bois, la mauvaise gestion des terres agricoles, l'élevage traditionnel et extensif, etc. En effet, la durée de la jachère a été raccourcie et a même disparu dans certaines localités du Sahel (Botoni et Reij, 2009). On assiste à une forte extension

des surfaces cultivées afin de pallier à la baisse des rendements agricoles et surtout pour faire face à des besoins alimentaires d'une population toujours croissante (Marchal, 1983; Botoni et Reij, 2009).

Dans ce double contexte de changement climatique et de croissance démographique, et face à la faible adoption des techniques modernes de lutte anti érosive, l'amélioration des techniques agricoles traditionnelles a connu un regain, notamment après la succession des années sèches de 1972/73 et en 1983/85 (Maisharou et al., 2015). A la suite de leur amélioration, ces techniques ont permis d'accroître les rendements agricoles, de récupérer de larges superficies de terres dégradés et d'accroître les revenus des ménages (Zougmoré et al., 2005; Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Danjuma et Mohammed, 2015; Maisharou et al., 2015). Ces nouvelles techniques de lutte contre le ruissellement et l'érosion généralement désignées sous le nom de « Techniques de Conservation des Eaux et des Sols et de Défense et Restauration des Sols (CES/DRS) » ont été largement adoptées au fil du temps par les communautés locales en Afrique de l'Ouest et sont actuellement promues en Afrique de l'Est et Australe (WOCAT, 2010; Danjuma et Mohammed, 2015). Ces techniques visent à fournir des conditions plus favorables au développement de la végétation et à restaurer progressivement les fonctions naturelles du sol en améliorant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les sols encroûtés peuvent ainsi être réhabilités avec de telles techniques malgré la forte variabilité et les faibles quantités de précipitations (Roose, 1994; Roose et al., 1995; Sawadogo et al., 2008).

2. Justification et objectifs de l'étude

De nombreuses études scientifiques ont été menées sur les techniques CES/DRS au Sahel. Parmi ces études, certaines focalisées sur la production de biomasse et de céréales ont montré une augmentation du rendement en céréales d'un facteur de 8 à 16 (Da, 2008; Zougmoré et al., 2014; Danjuma et Mohammed, 2015). D'autres par contre se sont intéressées au potentiel des techniques CES/DRS à la restauration des sols dégradés et à l'amélioration des revenus des ménages avec des bénéfices de l'ordre de 150-200 €/ha (Zougmoré et al., 2014; Zongo, 2016). Cependant, peu d'études ont examiné les changements induits par certaines de ces techniques CES/DRS sur le régime hydrique des sols et les processus hydrologiques (Duponnois et Dia, 2013). Ces techniques impliquent des modifications de la topographie à l'échelle de la parcelle, de la structure et de la texture, affectant ainsi la dynamique du ruissellement et de l'infiltration. R. Zougmoré et al., (2003) ont montré une réduction du ruissellement de 23% sur une parcelle

de cordon pierreux avec espacement entre les lignes de pierres de 25 m comparativement à une parcelle sans cordon pierreux. Kagambèga et al. (2017) ont montré une accumulation de 30% d'argile dans les parcelles de demi-lune comparativement aux parcelles de zaï. La collecte des eaux dans les dépressions ou l'interception des eaux de ruissellement par des «*barrières hydrologiques*» peut augmenter l'importance et la durée de l'infiltration, ce qui pourrait contribuer à l'augmentation des stocks d'eau disponibles dans le sol en vue de satisfaire la demande hydrique des plantes. À long terme, ces changements de comportements hydrologiques influencent également les propriétés du sol, modifiant ses processus physiques, chimiques et biologiques (Roose et al., 1995; Bambara et al., 2012b; Zougmore et al., 2014). Par exemple, limiter le ruissellement de surface entraîne non seulement une infiltration plus importante, mais empêche également le lessivage des amendements et la perte de sédiments, rendant ainsi la surface du sol moins sujette à la formation de croûte (R. Zougmore et al., 2003) et limitant la perte des nutriments. Ces modifications des propriétés du sol ont des répercussions sur les processus hydrologiques du sol. Cette modification du bilan hydrologique améliore les conditions hydriques du sol et constitue la source des capacités de restauration des sols par ces techniques CES/DRS.

Au Sahel, la plupart des études réalisées sur les techniques CES/DRS ont permis d'évaluer leurs performances au niveau local sur des échelles temporelles relativement courtes (2 à 3 ans). Cependant, l'impact de la variabilité climatique sur la performance à long terme de ces techniques agricoles est difficile à percevoir. Dans les zones arides et semi-arides, la disponibilité de l'eau pour les cultures est essentielle pour assurer une récolte satisfaisante à la fin de la campagne agricole. Le succès des techniques CES/DRS est donc conditionné par leur capacité à assurer une disponibilité continue en eau répondant aux besoins hydriques des plantes durant leur cycle végétatif. Les résultats escomptés de ces techniques sont souvent mitigés pendant les premières années après leur mise en œuvre, surtout lorsque les propriétés hydrodynamiques du sol ne sont pas encore améliorées. Les performances des différentes formes et configurations de ces techniques dépendent largement du volume d'eau qui peut être intercepté, stocké et progressivement infiltré dans le sol afin de maintenir la disponibilité de l'eau même pendant des périodes de sécheresse plus longues. Elles sont aussi influencées par le régime pluviométrique (quantité saisonnière de précipitations et sa distribution temporelle) et le régime climatique (contrôle de la demande d'évapotranspiration pour un type de culture spécifique) qui contribuent à la modification de la dynamique de stockage de l'eau du sol. Au regard du fait qu'on ne peut effectuer les mesures en tout point du système (la parcelle) étudié et que les processus hydrologiques ne sont pas facilement mesurables, une approche par le biais

de la modélisation est proposée afin d'appréhender l'impact des différentes techniques agricoles et du régime climatique sur le bilan hydrologique des sols. Pour ce faire, un modèle continu qui tient compte de la capacité de collecte d'eau par les techniques et de variation d'eau dans le sol durant les périodes inter-événements est requis. C'est pour répondre aux préoccupations suscitées que cette thèse dont le titre est « **Étude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso** » a été initiée dans le cadre du Programme 3^E (Eau, Environnement, Energie) financé par la Direction du Développement et de la Coopération Suisse (DDC).

Les questions de recherches qui sont abordées dans cette thèse sont les suivantes : (1) Quelles sont les performances hydrologiques des techniques CES ? (2) Quelle est la capacité des techniques à faire face aux poches de sécheresse ? (3) Et enfin quelles sont les performances de ces techniques dans un contexte de changement climatique ?

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer les performances hydrologiques des techniques de conservation des eaux et des sols sous le climat actuel et futur.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- évaluer les performances hydrologiques des différentes techniques culturales
- évaluer l'impact des techniques culturales sur le bilan hydrologique du sol
- identifier des techniques plus performantes au vu des changements climatiques

Ce travail de thèse n'abordera pas l'impact des cultures sur l'hydrologie du bassin versant du fait des moyens limités pour la régionalisation de la précipitation et de l'humidité du sol et le manque de connaissance sur les différents états de surface du bassin. Aussi, la question de la recharge des eaux souterraines ne serait pas abordée, car le drainage profond se fait essentiellement dans les axes d'écoulement et non sur les versants (IWACO, 1990).

3. Méthodologie de l'étude

La méthodologie mise en œuvre s'appuie non seulement sur une revue bibliographique mais surtout sur une expérimentation de 3 ans au Nord du Burkina Faso amenant des mesures, l'adaptation d'un modèle hydrologique et des simulations actuelles et futures selon les prévisions des modèles globaux sahéliens. Elle se décompose comme suit :

Le choix de la zone d'étude : La zone d'étude est le bassin versant de Tougou. Elle est située en zone climatique sahélienne et présente un milieu fortement dégradé. Aussi, les paysans de la zone sont vulnérables aux changements environnementaux. Le site retenu pour l'expérimentation est typique des sols dégradés en zone sahélienne. C'est un sol à croûte d'érosion abandonné car improductif. Le contexte et les objectifs de l'étude ont guidé le choix de la zone et du site d'étude.

Le dispositif expérimental : Le dispositif expérimental proposé a permis de mesurer pendant trois années successives (2015, 2016 et 2017) les paramètres météorologiques et hydrologiques de différentes techniques CES installées sur un sol dégradé. Il s'agit du cordon-pierreux, du zaï, de la demi-lune dont les performances hydrologiques seront comparées avec la technique traditionnelle de semis direct qui est la parcelle témoin.

L'étude du bilan hydrologique des techniques face à la variabilité climatique : Le modèle hydrologique conceptuel SCS-CN a été modifié pour reproduire les ruissellements observés et simuler à pas de temps journalier la variation du stock d'eau du sol en relation avec les régimes climatiques observés durant les 3 années d'expérimentation.

L'étude de la performance hydrologique à long terme des techniques CES/DRS : Le modèle hydrologique a été mis en œuvre pour étudier les performances hydrologiques des techniques CES sur la période allant de 1961 à 2009 afin de déterminer les techniques les plus performantes au regard du régime climatique du passé.

La sélection de techniques plus résilientes au climat : Des géométries du zaï ont été proposées sur la base du climat observé. La capacité du zaï proposée à satisfaire les besoins en eau des plants et à produire suffisamment selon le climat futur est étudiée.

4. Structuration de la thèse

Le présent document est structuré en six (6) chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre consiste en une revue bibliographique des impacts des changements environnementaux sur l'hydrologie des sols et le secteur agricole en zone sahélienne. Il mentionne également les stratégies d'adaptations adoptées par les paysans du Sahel pour atténuer les effets néfastes des changements climatiques sur l'agriculture.

Le deuxième chapitre porte sur la description physique et socio-économique de la zone d'étude. Un focus est fait pour justifier le choix de la zone d'étude et présenter une synthèse des études précédentes qui ont concerné cette localité située en zone sahélienne burkinabè.

Le troisième chapitre aborde le dispositif expérimental et le protocole de mesure qui ont permis de déterminer les performances hydrologiques des techniques CES. Il est évoqué plus précisément les résultats des effets des techniques de CES/DRS sur le ruissellement, les propriétés physiques (texture, porosité, taille moyenne des pores actifs) et hydrauliques (conductivité hydraulique saturée et non saturée, sorptivité) de surface du sol et le suivi des variables d'état (teneur en eau et charge de pression) du sol.

Le quatrième chapitre entame le développement d'un modèle hydrologique (SCS-CN modifié) permettant de reproduire le ruissellement de manière continue et de simuler les autres paramètres du bilan hydrologique à l'échelle parcellaire. Il comprend la calibration et la validation du modèle. Les résultats du ruissellement observé et simulé ainsi que la variation du stock d'eau dans le sol en fonction des techniques CES sont analysés et discutés. D'autres effets des techniques sur les propriétés hydrauliques de surface et les rendements agricoles sont également discutés à la lumière de l'analyse des résultats de la modélisation.

Le cinquième chapitre évalue les performances hydrologiques des techniques CES/DRS selon le climat observé dans le but d'appréhender l'impact de la variabilité climatique sur le stockage en eau du sol et d'identifier des techniques plus performantes par rapport au semis direct. Par la suite, la géométrie optimale du zaï permettant d'assurer de façon durable une satisfaction hydrique aux plants a été étudiée en utilisant les données du climat observé de 1961 à 2009 représentant un échantillon de variabilité climatique plus large que celui observé pendant les 3 années de suivi expérimental.

Le sixième chapitre étudie les performances hydrologiques du zaï par rapport au climat futur projeté dans le cadre du projet AMMA-2050. Une analyse est menée sur le potentiel du zaï à satisfaire les besoins en eau du mil aux horizons 2050 et 2099.

Chapitre 1 : Défis du secteur agricole face aux perturbations environnementales en zone sahélienne

1. Introduction

Le Sahel est l'une des régions du monde les plus fragiles à cause des perturbations environnementales (Waïgalo, 2018). L'agriculture, essentiellement de type pluviale procure près de 70 à 80% des revenus des populations actives (BAD, 2013). Cependant, depuis plusieurs décennies, le Sahel est confronté à une dégradation continue de ses terres due à une action combinée du climat et de la pression anthropique. De nombreuses études réalisées au Sahel concluent à un changement significatif du comportement hydrologique et à une baisse de la productivité agricole (Mahé et Paturel, 2009; Duponnois et Dia, 2013). La dégradation des sols à favoriser l'apparition de croûtes superficielles imperméables avec comme corollaire un accroissement des écoulements de surface et une baisse des infiltrations ne favorisant pas le développement adéquat des plantes à cause du manque d'humidité du sol (Duponnois et Dia, 2013). Face à de telles situations, les paysans sahéliens sous l'encadrement des services d'états et de certaines ONGs, ont mis en place des techniques novatrices visant à récupérer les sols dégradés et à augmenter la production agricole.

Pour mieux comprendre l'impact des perturbations environnementales sur la vulnérabilité des populations du Sahel dans une perspective d'apporter des solutions, ce chapitre se propose de rappeler l'importance du secteur agricole pour les Sahéliens, ensuite de faire un état des lieux des effets des changements environnementaux sur l'hydrologie et l'agriculture et enfin de relever les stratégies d'adaptations mises en place pour permettre une résilience des producteurs face à ces perturbations environnementales.

2. Importance de l'agriculture pour les pays sahéliens

L'agriculture sahélienne constitue la principale source de revenus de 70 à 80% de la population active et procure plus de 50% des recettes d'exportation (BAD, 2013). L'agriculture pluviale est le pilier de la plupart des économies africaines et participe pour 10 à 70% au Produit Intérieur Brut (Biazin et al., 2012). En Afrique Sahélienne 97% des terres agricoles sont sous culture pluviale et exploitées par des petits agriculteurs (Rockström et al., 2004). On estime que 41% de la population Sahélienne vit sur des terres sujettes à la sécheresse (Svendsen et al., 2009). Les faibles revenus des ménages du Sahel et l'accès difficile aux ressources en eau souterraine

limitent l'agriculture d'irrigation autour des retenues d'eau, rendant ainsi chaque récolte saisonnière essentielle pour la subsistance de la population locale. Les petites exploitations familiales qui occupent moins de 2 ha en moyenne, produisent jusqu'à 90% des besoins alimentaires des pays du Sahel (Wiggins et Sharada, 2013). À titre d'exemple les valeurs ajoutées (en % du PIB) du secteur agricole à l'économie du Burkina Faso, du Mali et du Niger sont respectivement de 27.8, 38.3 et 39.7 (Banque mondiale, 2017). Selon le GIEC, (2013), les conséquences du changement climatique sur les économies africaines sont évidentes.

L'impact du climat sur l'agriculture (longues poches de sécheresse, répétitions des poches de sécheresse, fortes chaleurs, précipitations de fortes intensités) influence négativement l'économie des pays sahéliens. En 2016, l'insécurité alimentaire affectait 37 millions de personnes au Sahel, dont 21% sévèrement atteints (Waïgalo, 2018). La GTZ (2007) attirait déjà l'attention sur une aggravation de la situation alimentaire durant la décennie à venir en zone aride et expliquait cet état par le constat d'une tendance générale à l'accroissement des risques climatiques et la baisse des capacités des milieux naturels et sociaux à s'adapter aux changements environnementaux. En effet, les changements climatiques (irrégularité des pluies, augmentation de la température) et les pressions anthropiques (surpâturage, défrichements, feux de brousse, surexploitation des sols peu productifs) ont favorisé la dégradation des sols et engendré de fortes détériorations des systèmes de productions agricoles générant ainsi des impacts socio-économiques importants. Ces conséquences ont été directement ressenties sur les moyens d'existence des populations du Sahel. Duponnois et Dia, (2013) rapportent que cette situation à laquelle est confrontée depuis quelques décennies la zone sahélienne a instauré une précarité, une insécurité alimentaire voire la famine et la pauvreté. Ainsi, plus de 60% des foyers dans le Sahel sont exposés à l'insécurité alimentaire et vivent dans les zones rurales où sont enregistrés les Indices de Développement Humain (IDH) les plus faibles du monde. Des analyses plus récentes en 2018, conduites par le Bureau des Nations Unies pour la Coordination des Affaires Humanitaires (OCHA) et le Comité Inter-Etat de lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) dénoncent une crise alimentaire au Sahel et appellent à l'action pour éviter le dénuement à des millions de personnes (UN OCHA, 2018). Les causes de cette crise sont surtout liées aux déficits de précipitations de la saison 2017 qui ont conduit à de graves pénuries d'eau et des déficits hydriques pour les cultures; par conséquent à une diminution drastique des rendements agricoles et à une augmentation des coûts des produits alimentaires. Des taux d'insécurité alimentaire et de malnutrition extrêmement élevés allant de la phase minimale à la phase de famine ont été enregistrés à travers les pays du Sahel (CILSS, 2018). La **Figure 1-1**

présente la situation alimentaire et nutritionnelle projetée au Sahel et en Afrique de l’Ouest pour les mois de juin-août 2018. Cette analyse révèle des zones de famines indiquant que même avec l’aide alimentaire, au moins un ménage sur cinq présente un déficit complet en alimentation et/ou d’autres besoins de base. Presque 6 millions de personnes ont besoin d’aide alimentaire et 1,6 million d’enfants risquent d’être confrontés à une malnutrition aiguë sévère (MAS) pouvant menacer leur vie. Environ 2,5 millions d’éleveurs et d’agropasteurs sont confrontés à un grave risque de crise des moyens de subsistance (CILSS, 2018).

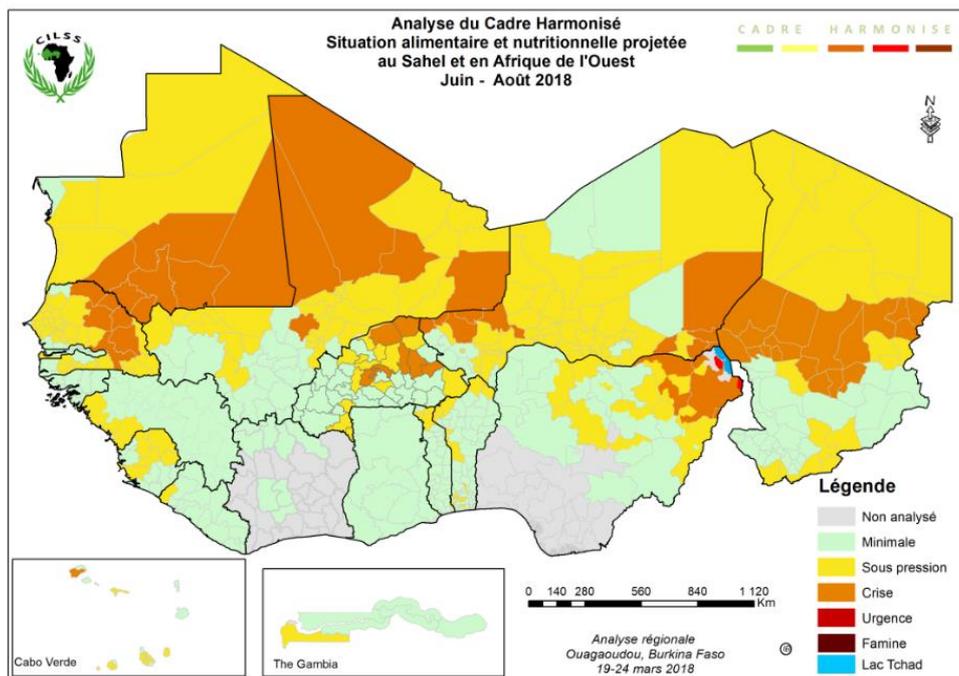


Figure 1-1: Situation alimentaire et nutritionnelle projetée au Sahel et en Afrique de l’Ouest : Juin-Août 2018 (Source : CILSS, 2018)

3. États des connaissances sur les perturbations environnementales au Sahel

3.1. Variabilités et changements climatiques au Sahel

Le changement climatique se réfère à la modification (ou variation) significative du climat à long terme dû essentiellement aux activités humaines (Cook et al., 2016). On notera que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) définit les changements climatiques comme des « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l’atmosphère mondiale et qui viennent s’ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (IPCC, 2013). L’augmentation des gaz à effet de serre (GES) liée aux activités

anthropiques est à l'origine de cette modification du climat conduisant ainsi, à une forte variabilité du climat au Sahel. La moyenne globale des températures de surface au Sahel a déjà augmenté de 0.85°C entre 1880 et 2012 (Stocker, 2014). Une étude réalisée au Burkina Faso, a montré aussi une augmentation significative des températures annuelles moyennes de l'ordre de 0.9°C sur la période de 1981 à 2010 (Aziz and Obuobie, 2017). Des études sur le climat au Sahel, montrent que sur la période 1990-2010, la variabilité pluviométrique observée se traduit par : (i) un caractère de plus en plus aléatoire des dates de début et de fin de la saison des pluies et de l'apparition plus fréquente des séquences sèches ; (ii) des tendances détectées majoritairement à la baisse des cumuls pluviométriques annuels ; (iii) la fréquence des événements extrêmes et la succession des longues poches sèches (Gachon et al., 2007; Alhassane et al., 2013). La pluviométrie a diminué de 10 à 30% au cours de la période de 1968-1995, et le déficit perdure dans de nombreuses régions du Sahel (Lebel et Ali, 2009). Ces études mettent en évidence une atténuation de la sécheresse dans la partie centrale et à l'est du Sahel, alors qu'elle persiste de façon très prononcée à l'ouest. Le Barbé et Lebel, (1997) expliquent cette diminution de la pluviométrie par une baisse du nombre d'évènements pluvieux. D'après Ibrahim (2012), les changements significatifs observés sur les cumuls annuels des précipitations corroborent avec une baisse de la fréquence des pluies, éventuellement complété d'une hausse des intensités des pluies. Selon Karambiri et al., (2011) l'analyse basée sur l'ensemble des données climatiques observées sur la période 1970-1990 présente un comportement non stationnaire et une augmentation de la longueur des séquences sèches en Afrique de l'Ouest. En effet, dans la zone Sahélienne, à partir des années 1990, le nombre de séquences sèches a été en moyenne de quatre par campagne (**Figure 1-2a**), nombre supérieur à la période d'avant (1978-1990). Toujours dans la même zone, c'est à partir de 1998 qu'on observe des séquences sèches de plus de 16 jours (**Figure 1-2c**). Au niveau de la zone sahélo-soudanienne, les séquences sèches longues montrent une certaine stabilité avec des durées n'excédant pas quinze jours en moyenne (**Figure 1-2d**), avec un nombre de séquences sèches variant entre 3 et 4 (**Figure 1-2b**). Néanmoins, à partir de 1984, on remarque une forte variabilité de la durée des séquences sèches (8 à 17 jours). D'après Alhassane et al., (2013), la variabilité des séquences sèches est plus importante ces depuis les années 1960 et les risques de stress hydrique pour les cultures augmentent avec la persistance des séquences sèches. Ces études sur le climat démontrent une accentuation des séquences sèches et une incertitude sur les dates de début et de fin des saisons pour le Sahel.

En ce qui concerne les prévisions climatiques, l'IPCC (2013) prévoit une augmentation de la température moyenne globale de l'ordre de +2 à +4°C entre 2080 et 2100 par rapport aux niveaux préindustriels. Au Sahel, les modèles s'accordent sur une augmentation des températures et si rien n'est fait pour réduire les émissions des GES, cette augmentation pourrait atteindre jusqu'à +4°C à l'horizon 2100 (IPCC, 2013). Cependant, en Afrique de l'Ouest, et au Sahel en particulier de fortes incertitudes demeurent sur l'évolution des précipitations. Les modèles prévoient une forte variabilité saisonnière accompagnée de risques plus élevés de l'occurrence des événements extrêmes (Nassourou et al., 2018). Ainsi, on projette une baisse de pluie de 5 à 10% entre 2020 et 2050, et une baisse plus importante de 10 à 25% dans la période 2050-2080, dans les pays sahéliens, sauf au Tchad (Nassourou et al., 2018). Au Burkina Faso, les précipitations pourraient diminuer de l'ordre de 33% d'ici l'horizon 2100 (Aziz and Oubuobie, 2017). Dans certains pays du Sahel, sans mesures d'adaptation efficaces, les rendements agricoles pourraient baisser de 50% d'ici 2020 ; ce qui occasionnerait de lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et nutritionnelle (IPCC, 2013).

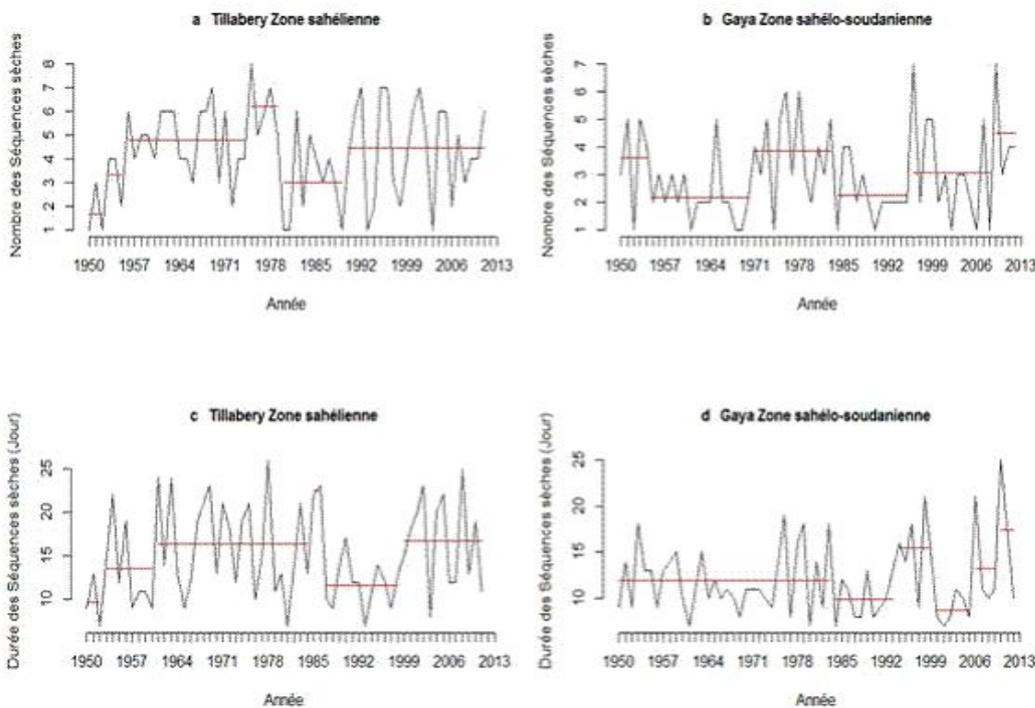


Figure 1-2: Evolution du nombre des séquences sèches (en haut) et de la durée des séquences sèches (en bas) au niveau de la Station de Tillabery et Gaya (d'après Nassourou et al., 2018)

3.2. Pression démographique

La dégradation des terres au Sahel a une origine double, l'action du climat et celle de l'homme. L'explosion démographique après les années 1960 (taux annuel d'accroissement d'environ 3%) a accéléré la pression de l'homme sur les ressources naturelles réduisant la végétation ligneuse de l'ordre de 5 à 20% (Marchal, 1983; Guengant et al., 2003; Fensholt and Rasmussen, 2011). Dans les pays du Sahel, la pression humaine sur l'environnement se traduit par un raccourcissement, voire une disparition de la jachère ; un surpâturage extensif avec comme corollaire le compactage du sol par le piétinement des animaux et le recours à des techniques culturales inadéquates (feu de brousse, labour superficiel) qui détruisent la couverture végétale et rendent le sol vulnérable à l'érosion. Dès lors, les conséquences sur la fertilité des sols furent graves. Les agriculteurs pour augmenter les rendements agricoles et satisfaire les besoins de la population ont dû étendre les surfaces cultivées en décimant une partie importante de la végétation (Botoni et Reij, 2009). Luxereau et Roussel (1997) montrent à travers leurs études l'inquiétude des paysans au regard de la dégradation des terres au Sahel. *Ils affirmaient qu'il n'y avait plus de brousse, plus de bêtes sauvages, que les pluies avaient diminué et que la terre était fatiguée.* La conséquence de cette surexploitation de la nature a été la dégradation physique, biologique et chimique des sols aboutissant à l'apparition de sols dénudés et encroutés.

3.3. Dégradation des sols

L'érosion est l'une des causes majeures de la dégradation des sols en zone semi-aride. Elle est marquée par l'arrachement, le transport et le dépôt des particules du sol sous l'impact des effets naturels et anthropiques (Nonguierma et Tapsoba, 2003). Les causes naturelles liées à l'eau et au vent sont aggravées par l'action de l'homme (mauvaises techniques culturales, déforestation, élevage extensif, etc.). Le phénomène d'érosion emporte la couche arable du sol entraînant une perte du potentiel de production du sol du fait de la diminution de la fertilité et de l'incapacité du sol à stocker l'eau (Bliefert et Perraud, 2008).

La dégradation des sols en zone semi-aride se manifeste principalement par un phénomène d'encroûtement. Les types de croûtes et leur formation ont été largement décrits par Casenave et Valentin (1989). Les mécanismes de formation des croûtes sont expliqués comme suit : l'humectation qui provoque l'éclatement, la dispersion des agrégats selon la teneur en argile du sol ; l'impact des gouttes de pluie qui fractionne les particules du sol par effet splash ; le

ruissellement qui provoque l'arrachement, le transport et le dépôt des particules selon un écoulement turbulent ou laminaire ; la dessiccation marquée par le retrait et l'induration et enfin l'action du vent qui conduit à l'arrachement (déflation), le transport (suspension, saltation) et le dépôt des particules par tri granulométrique.

D'après les mêmes auteurs, on distingue deux groupes de croûtes de surface. Les croûtes structurales formées par la réorganisation in situ des particules du sol et les croûtes de dépôts résultant de la réorganisation des particules transportées à quelques distances du lieu de l'arrachement. Dans le premier groupe de croûtes (croûtes structurales), on différencie trois types selon le nombre et la nature des micro-horizons (Casenave, 1991) : on a d'abord la croûte de dessiccation (DES) constituée d'un micro-horizon sableux superficiel, légèrement pris en masse et très fragile, la croûte structurale (STRU) proprement dite qui est constituée de micro horizons à sable fin recouvrant une pellicule fine et plasmique et enfin, la croûte gravillonnaire (GRAV) constituée de trois microhorizons à sables grossiers et incrustés d'éléments grossiers (graviers à hauteur de 40%) recouvrant une pellicule plasmique épaisse. À ces trois types de croûtes structurales, s'ajoute la croûte d'érosion (ERO) qui résulte de la destruction partielle de la croûte structurale, elle est constituée d'un micro-horizon affleurant mince et dur, argileux, lisse et de couleur brun grisâtre à structure continue, la croûte de ruissellement (RUI) formée dans les zones de ruissellement recouvrant les croûtes structurales, elle est composée de micro-horizons de sables qui alternent avec de l'argile très compacte et enfin, les croûtes de décantation (DEC) caractérisée par un tri granulométrique vertical très net, les sables se trouvent à la base et l'argile au sommet. Elles se forment lors de la décantation des sédiments dans l'eau au repos (flaque, marre). En séchant, elles se craquellent et se fendent. En plus des types de croûtes citées, il existe sur de grandes étendues de surface au Sahel des croûtes biogéniques. Les croûtes biogéniques sont des associations des particules du sol avec des cyanobactéries, des algues, des champignons constituant une couverture végétale dans les milieux sahéliens. Elles influencent significativement les processus écosystémiques primaires, car elles modifient les conditions de surface du sol telles que la microtopographie, la fertilité, la rugosité, la porosité et la microbiologie du sol affectant ainsi l'hydrodynamisme des sols (Maestre et Cortina, 2002; Malam Issa et al., 2009; Chamizo et al., 2012).

Les études réalisées sur les processus de formation des croûtes superficielles ont montré que l'encroustement conduit à la dégradation de la structure de surface du sol, la destruction des agrégats, la disjonction des particules et la compaction de la surface par les gouttes de pluie (Duley, 1940; Le Bissonnais, 1990; Ambouta et al., 1996). Cet encroustement de surface du sol

modifie les propriétés hydrauliques de surface à travers l'épaisseur de la croûte et sa conductivité hydraulique et affecte l'émergence des semis et le stockage de l'eau du sol (Hadas et Frenkel, 1982; Boiffin, 1984; Ribolzi et al., 2006).

4. Conséquence des changements environnementaux sur l'hydrologie et l'agriculture

Les multiples travaux réalisés au Sahel concluent à un changement significatif du comportement hydrologique depuis les années 1960, associé à des variations climatiques et à des modifications de l'occupation des sols. Albergel (1987); Amogu (2009); Descroix et al. (2011, 2009) ont montré une augmentation des écoulements au moment où la sécheresse était la plus accentuée (milieu des années 1980) en zone sahélienne. Ils ont associé ce phénomène au changement d'occupation des sols. L'étude fine des processus de genèse des écoulements dans cette zone montre, par des campagnes de simulation de pluie associées à une étude pédologique des horizons superficiels du sol, que la capacité d'infiltration des sols sahéliens est sous la dépendance quasi exclusive des propriétés de la surface du sol, en particulier de son encroutement. Il a été constaté, à l'échelle de la parcelle, une diminution de la conductivité hydraulique sur des sols encroutés comparé aux sols cultivés et aux jachères (Casenave et Valentin, 1989; Ndiaye et al., 2005; Niang et al., 2012; Mounirou et al., 2012; Abdou et al., 2015). Ces auteurs montrent que l'encroutement des sols se traduit par une forte augmentation du ruissellement (coefficient de ruissellement compris entre 50 et 80%), ce qui est dû à la très forte diminution de la conductivité hydraulique (valeurs comprises entre 2 et 20 mm/h). Les processus d'encroutement associés à l'augmentation du ruissellement ont entraîné un accroissement des débits aux exutoires des bassins sahéliens (**Figure 1-3**). Ce phénomène a été caractérisé de « paradoxe hydrologique du Sahel » (Amogu, 2009; Descroix et al., 2011, 2009) et a conduit à une diminution de la capacité de rétention en eau des bassins.

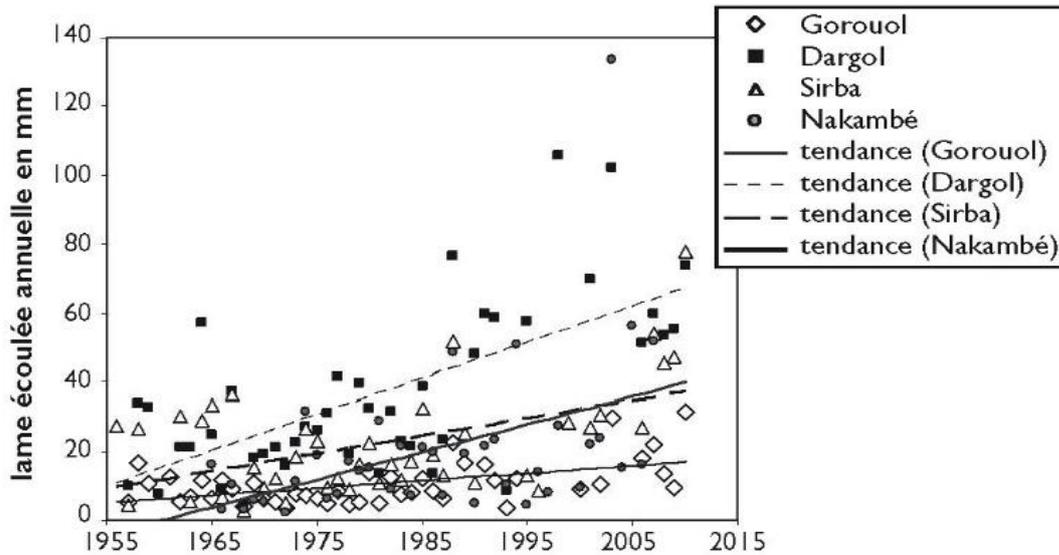


Figure 1-3: Augmentation des débits des cours d'eau sahéliens durant la sécheresse (Duponnois et Dia, 2013)

Outre la péjoration climatique, les pertes d'eau de pluie impactent sérieusement l'agriculture pluviale en zone sahélienne. L'évaporation du sol peut atteindre 50% des précipitations (Daamen et al., 1995; Rockström et al., 1998). Près de 10 à 65% des précipitations peuvent être perdues en raison du ruissellement de surface (Araya et Stroosnijder, 2010; Mounirou et al., 2012). En fonction de la pluviométrie, le drainage au-delà de la profondeur racinaire peut atteindre 30% des précipitations (Klaij et Vachaud, 1992). En conséquence, plus de 65% des précipitations dans les surfaces de culture en zones arides peuvent être perdues de manière non productive. Plus inquiétant, Mounirou et al. (2012) ont montré que sur les sols dégradés avec croûte d'érosion ou gravillonnaire le ruissellement peut atteindre 96% de la pluie. Rockström et al. (1998) ont soutenu que sur une culture non fertilisée, seulement 4 à 9% des précipitations sont utilisées pour la transpiration des plantes dans le pire des cas, comme dans la région du Sahel au Niger.

La rareté des pluies et la dégradation des sols (baisse de la conductivité hydraulique, faible fertilité) sont les principaux facteurs affectant les rendements agricoles dans les régions du Sahel. Ceci est une explication de l'écart de rendement important dans les systèmes agricoles en zones arides, où la rareté récurrente des pluies affecte le potentiel de rendement. De plus, les recherches indiquent que la carence en nutriments du sol est un facteur limitant la croissance des cultures (Klaij et Vachaud, 1992; Serme, 2015; Siene et al., 2016).

En réponse à ces changements environnementaux, des initiatives locales, nationales, régionales accompagnées des partenaires au développement ont été entreprises en vue d'améliorer les

rendements agricoles, de restaurer les potentialités des sols dégradés et surtout d'accroître les revenus des ménages. Ces initiatives ont été développées et adoptées après les grandes sécheresses des années 1973-74.

5. Stratégies d'adaptation des paysans sahéliens

5.1. Adoption des techniques de conservation des eaux et des sols

Dans le cadre de la restauration de la productivité des terres dégradées et de la réhabilitation de leur couverture végétale, les paysans en collaboration avec les services d'états et les ONGs ont mis en œuvre des techniques novatrices permettant d'accroître la résilience vis-à-vis des changements environnementaux. Ces techniques ont été mises au point et testées entre 1980 et 1985. Elles ont été promues par les projets entre 1980 et 1990. Par exemple, entre les années 1980 et 1990 au Burkina Faso, le Projet d'Aménagement des Terroirs et de Conservation des Ressources dans le Plateau central (PATECORE) financé par l'Allemagne a aidé les paysans à élaborer des stratégies et des approches techniques environnementales et agricoles pour parvenir à une gestion durable des unités paysagères (Maisharou et al., 2015). La mise en valeur des terres par le PATECORE, a permis d'améliorer un total de 100 000 ha de terres agricoles avec des diguettes en pierre et des cordons pierreux. Entre 1995 et 2002 dans les 7 provinces que sont le Passoré, le Sanmatenga, le Bam, le Yatenga, la Boulkiemdé, le Sanguié et le Namentenga, du bilan des activités de la phase 2 du Programme Spécial de Conservation des Eaux et des Sols et de l'Agroforesterie (PS/CES-AGF), il ressort les réalisations suivantes : 20 202 fosses fumières, 747 digues filtrantes, 32 425 ha de zaï, 312 ha de demi-lune et des milliers de plants (Da, 2008). Au Niger, le Projet de Développement Rural de Tahoua (PDRT) s'est focalisé sur l'amélioration des terres communales sur les plateaux, les pentes et les terres agricoles, en utilisant les diguettes, le zaï, les tranchées Nardi, des diguettes semi-circulaires pour restaurer plus de 125 000 ha. Le projet Opération Acacia a amélioré la productivité de plus de 4 000 hectares de terres agro-sylvo-pastoral dégradées (Maisharou et al., 2015; WOCAT, 2019) à l'aide de la technologie Vallerani; tandis que des centaines de milliers d'hectares ont été réhabilités par le projet de développement rural intégré de Keita.

Dès lors, la conservation des eaux et des sols devient une composante à part entière dans tous les projets de développement rural intégré. Selon Kaboré et Reij (2004); Reij et al. (2009), les aménagements ont permis aux producteurs agricoles d'accroître leurs rendements, de réintégrer des arbres dans le système agricole et d'intensifier l'élevage. Les investissements énormes des

projets et de la population dans le capital productif de leurs terres ont abouti à une intensification générale de l'agriculture. L'approvisionnement en eau a pu être facilité grâce à des aménagements favorisant l'infiltration des eaux et la réalimentation des nappes phréatiques. Les mesures de CES visent plusieurs buts à la fois : (i) une meilleure gestion de l'eau, (ii) l'augmentation de la productivité des espaces agricoles, sylvicoles et pastoraux et (iii) une gestion durable des sols sur le plan environnemental, social et économique.

5.1.1. Les techniques de conservation des eaux et des sols au Sahel

Les nombreux succès des techniques de récupération des terres dégradées dans les différents pays du Sahel (Barbier et al., 2009; WOCAT, 2010; Duponnois et Dia, 2013; Maisharou et al., 2015) ont permis d'améliorer la productivité des espaces exploités et d'accroître la résilience des populations face aux effets des changements environnementaux. Les bonnes techniques agricoles sont définies comme des pratiques permettant de satisfaire les besoins actuels et d'améliorer les moyens d'existence, tout en préservant l'environnement de façon durable. En d'autres termes, c'est l'utilisation de techniques agricoles qui minimisent les risques, maximisent la production tout en assurant la sécurité humaine (MAHRH, 2008; FAO, 2012). Ainsi, parmi les bonnes techniques agricoles de CES/DRS essentiellement pratiquées en zone sahélienne on peut citer : les cordons pierreux, le zaï, la demi-lune, les bandes enherbées, le paillage, le labour à plat et cloisonné, la cuvette « koglogo », la régénération naturelle assistée (RNA), la fixation des dunes, etc.

a) Les cordons pierreux

Description : La technique des cordons pierreux (**Figure 1-8a**) est une méthode de lutte contre l'érosion. Construite avec des pierres encastrées dans le sol en série, ils constituent des mesures mécaniques pour réduire l'érosion hydrique sans pour autant bloquer l'écoulement de l'eau. On les qualifie d'ouvrages semi-perméables. Les cordons pierreux dissipent le ruissellement en amont des pierres et favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol et une sédimentation des matériaux flottants transportés (les pailles, les fèces, différents grains, et diverses matières organiques).

Caractéristiques techniques : Les diguettes en cordons pierreux sont réalisées sur des courbes de niveau à l'aide du niveau à eau, du triangle à sol ou par un levé topographique. Les

écartements entre les cordons varient en fonction de la pente. Les pierres sont déposées dans un sillon d'ancrage ouvert à l'aide d'une pioche de 10 à 15 cm de profondeur et de 15 à 40 cm de largeur en crête sur la ligne tracée (Zougmoré et al., 2000a; WOCAT, 2016a). La distance entre les cordons varie entre 15 à 50 m sur des pentes entre 0.5 et 3% (Vlaar,J, 1992; WOCAT, 2016a). Pour une viabilité du caractère filtrant, le cordon pierreux peut être végétalisé avec des espèces herbacées ou arbustives (*Andropogon sp.*, *Vetiveria zizanioides*, *Ziziphus mauritiana*, *Bauhinia rufescens*, *Piliostigma reticulatum*, etc.). L'efficacité du cordon sur l'amélioration des rendements est renforcée avec l'amendement organique à la dose minimale de 2,5 t/ ha / an et le sol doit être travaillé toujours parallèlement au cordon (Africare et Inera, 2014a). La **Figure 1-4** présente un dessin technique de l'implémentation de la technique de cordon-pierreux.

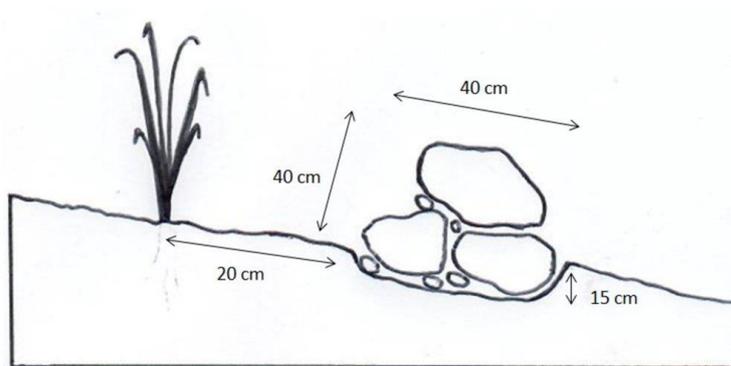


Figure 1-4: Dessin technique de la technologie des cordons pierreux : Source (WOCAT, 2016a)

Performances : Les cordons pierreux améliorent la rétention d'eau et l'infiltration dans le sol, augmentent la quantité d'eau disponible pour les plantes et garantissent une bonne récolte (Zougmoré et al., 2000a; Nyamekye et al., 2018). Les cordons-pierreux réduisent les pertes de terre de l'ordre de 95% (Schmengler, 2011). Ils assurent également une protection contre l'érosion éolienne en cas de bonne croissance de la couverture végétale. Zougmoré et al., 2000 montrent qu'avec un écartement de 33 m entre les cordons, le ruissellement est réduit de 12% et les pertes en sols sont réduites de 46%. Le taux d'humidité moyen par parcelle est d'autant plus élevé que l'espacement entre cordons est plus faible. L'humidité du sol en amont immédiat des cordons pierreux est plus importante que sur le reste du champ. En année de pluviosité déficitaire, le gain de production en grain de sorgho est de 109% pour un écartement de 33 m. En année de bonne pluviométrie (périodes sèches moins fréquentes), les gains de production varient de 20 à 70%.

Zones d'adoption, contexte agro-écologique et contraintes liées à la mise en œuvre de la pratique : La technique de cordon pierreux est largement adoptée au Niger, au Burkina Faso, au Mali, en Mauritanie, au Sénégal et au Nigéria (WOCAT, 2010; Maisharou et al., 2015). Les zones agro-climatiques où les cordons pierreux sont les plus adaptés sont les zones nord-soudaniennes et sahéliennes où la pluviométrie est en moyenne de 300 à 900 mm. Les cordons pierreux sont généralement utilisés sur les sols dégradés, dénudés et sur les sols situés sur des pentes marquées qui favorisent le ruissellement. Les cordons pierreux s'utilisent sur presque tous les types de sols à l'exception des sols de bas-fonds inondables (sols hydromorphes, sols peu évolués d'apport colluviaux-alluviaux). La technique exige un travail collectif ou une main-d'œuvre familiale importante, une disponibilité des cailloux à proximité des zones à aménager. Elle exige également une bonne maîtrise des méthodes de détermination des courbes de niveau, une disponibilité de la matière organique et/ou une maîtrise des techniques de compostage.

b) Le zaï / tassa

Description : Le zaï (**Figure 1-8b**) est une technique traditionnelle originaire du Yatenga (Nord du Burkina Faso). Au Niger, il est appelé tassa. Il permet de récupérer les terres dégradées et d'augmenter des rendements agricoles par amélioration de l'infiltration et de la fertilité des sols. La technique consiste à collecter l'eau de ruissellement afin de favoriser son infiltration sur des terres généralement dégradées, encroûtées impropres à l'agriculture. Il opère par piégeage dans le poquet des matières organiques déplacées par le vent améliorant ainsi la fertilité des sols. Pendant l'évènement pluviométrique, il capte, infiltre et stock l'eau en profondeur ce qui diminue les pertes par évaporation.

Caractéristiques techniques : Le zaï consiste à creuser des poquets de plantation avec des rangées décalées perpendiculairement à la pente. Il peut se décliner en zaï agricole ou zaï forestier en fonction de l'objectif du producteur. Le zaï agricole consiste à creuser des poquets de 20-40 cm de diamètre et de 10 à 20 cm de profondeur. Ils sont espacés d'environ 1 m entre les directions selon les cultures. La terre excavée est déposée en croissant vers l'aval du creux et cela aide à capter les eaux de ruissellement. Cette collecte d'eau est favorisée par l'impluvium constitué par les parties encroûtées restantes. Les lignes de zaï doivent être décalées (en quinconce) et perpendiculaires à la plus grande pente du terrain. La taille des poquets et leur espacement varient selon le type de sol et selon les régions : elles ont tendance à être plus grandes sur les sols gravillonnaires qui sont peu perméables que sur les autres types de sols

(sablo-argileux ou limono-argileux). Dans ces poquets sont piégés des sables, des limons et des matières organiques déplacés par les vents secs (harmattan). Les poquets de zaï sont creusés pendant la saison sèche (novembre à mai). La matière organique y est ensuite apportée en quantité variable selon les paysans (une poignée d'adulte soit environ 300 g/trou) sous forme de fumier, de compost avant la période des semis et la paille en fin de saison de pluie. Couvrir si possible de paillis les espaces entre trous de zaï pour augmenter la rétention en eau du sol et déclencher une activité biologique du sol notamment les termites (WOCAT, 2011; Africare and Inera, 2014b). La **Figure 1-5** présente un dessin technique de l'implémentation de la technologie du Zaï.

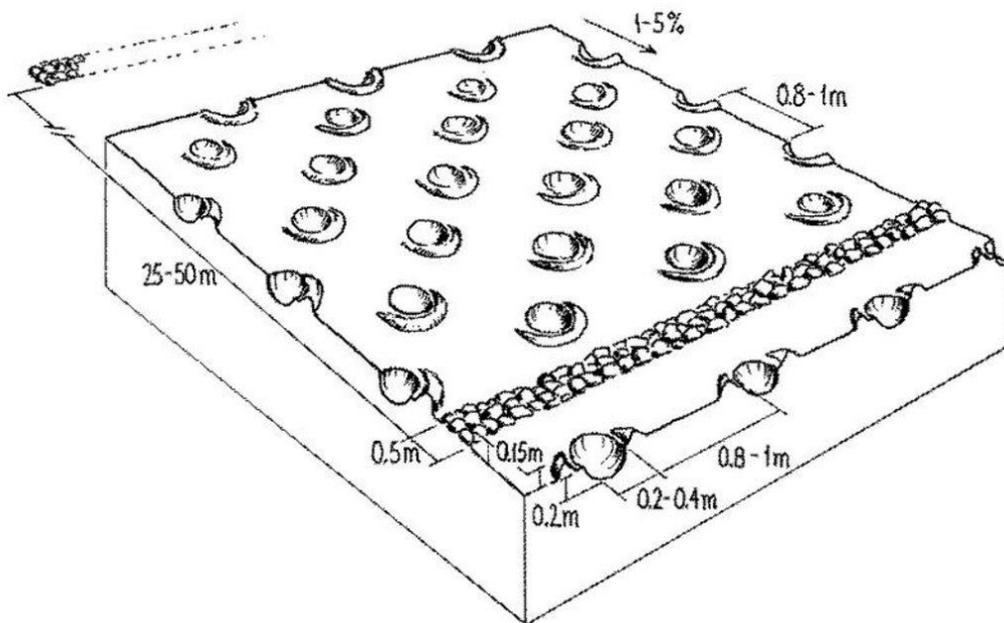


Figure 1-5: Dessin technique de la technologie du Zaï. Source : (WOCAT, 2011)

Performances : Le poquet seul (sans aucun apport minéral ou organique) permettait dès la première année de doubler les rendements en grains par rapport au semis sur le sol encroûté selon la méthode traditionnelle à la daba (Zougmoré et al., 2000b). Toutefois, le rendement est très faible (inférieur à 100 kg/ha de grains de sorgho). Mando et al. (2001), mesurant les effets des zaï sur le rendement du sorgho dans une station de recherche de l'INERA, ont montré une augmentation des rendements, qui passaient de 70 à 300 kg/ha environ (moyenne de deux années). Roose et al. (1993), qui ont étudié les effets du zaï au Burkina Faso et au Nord Cameroun, ont également mesuré des accroissements spectaculaires de rendement du sorgho (de 63 à 976 kg/ha en année humide, de 22 à 550 en année plus sèche) résultant d'effets

combinés de la rétention d'eau, du compostage et d'une fumure minérale d'appoint, et a permis de préciser les limites de pluviométrie à l'intérieur desquelles le zaï constitue une alternative adaptée. La mise en œuvre de ces techniques exige certes beaucoup de travail – là encore en saison sèche –, mais elle se satisfait de ressources disponibles dans l'exploitation, contrairement aux cordons pierreux. Le plus grand avantage du zaï, c'est qu'il permet de réhabiliter des sols pauvres et encroûtés dans un délai très court c'est-à-dire à l'intervalle d'une seule campagne agricole (Zougmore et al., 2004a; Da, 2008; Barry et al., 2009; Zougmore et al., 2014; Danjuma and Mohammed, 2015).

Zones d'adoption, contexte agro-écologique et contraintes liées à la mise en œuvre de la pratique : La technique de zaï est largement adoptée au Burkina Faso, au Mali, au Niger, au Sénégal et au Nigéria (WOCAT, 2010; Maisharou et al., 2015). Le Zaï est bien adapté à la zone nord soudanienne et sahélienne, où la pluviométrie annuelle est en moyenne de 300 à 800 mm. La technique nécessite une main-d'œuvre importante et la disponibilité de la matière organique. Le zaï a un taux d'adoption compris entre 60 et 80% (Ouédraogo et Lompo, 2006; Diiro et al., 2017; Kpadonou et al., 2017). Il faut noter que les rendements obtenus du zaï sont à cents pour cent des bénéfices de la technique dans la mesure où elle est appliquée sur des terrains dégradés qui ont été abandonnés car ne permettant pas une production agricole (Vlaar, J., 1992).

c) La Demi-lune

Description : La technique de demi-lune (**Figure 1-8c**) a pour objectifs d'augmenter l'infiltration et le stock d'eau du sol, de récupérer et de restaurer la fertilité des sols encroûtés pour l'utilisation agronomique et agro-forestière. À la différence du Zaï, la demi-lune est plus large, offre plus de surface de semis et de collecte de l'eau. Elle est particulièrement avantageuse quand la pluie est rare. Elle permet le ralentissement et la collecte de l'eau de ruissellement favorisant ainsi son infiltration sur des sols encroûtés impropres à l'agriculture.

Caractéristiques techniques : La demi-lune est une cuvette de la forme d'un demi-cercle ouverte par creusage à l'aide de pic, pioche et pelle. La terre de déblais est déposée en aval du demi-cercle en un bourrelet semi-circulaire au sommet aplati. Son implantation se fait par pivotement à l'aide d'un compas de 2 m de rayon. Les dimensions couramment utilisées sont : diamètre: 4 m; profondeur: 0,15 à 0,25 m. Les demi-lunes sont réalisées sur les courbes de niveau préalablement tracées et les écartements sont de 8 m entre les lignes à partir du centre de la demi-lune et de 4 m entre les demi-lunes, soit une densité de 312 demi-lunes à l'hectare.

Le nombre de poquets par demi-lune varie de 20 à 30. Les demi-lunes sont disposées en quinconce, c'est-à-dire que la disposition de la deuxième ligne de demi-lunes se fait en décalant les demi-lunes par rapport à celles de la première ligne de telle sorte que les extrémités des demi-lunes sur les deux lignes successives soient toujours au même niveau. L'efficacité de la demi-lune est améliorée par l'apport d'environ une brouettée de fumier d'étable ou de compost (35 kg) par demi-lune. Certains arbustes qui poussent sur les bourrelets peuvent contribuer à reconstituer la végétation du site s'ils sont bien gérés (Zougmoré and Zida, 2000; Africare and Inera, 2014c; Barrow, 2014). La **Figure 1-6** présente un dessin technique de l'implémentation de la technologie de la demi-lune.

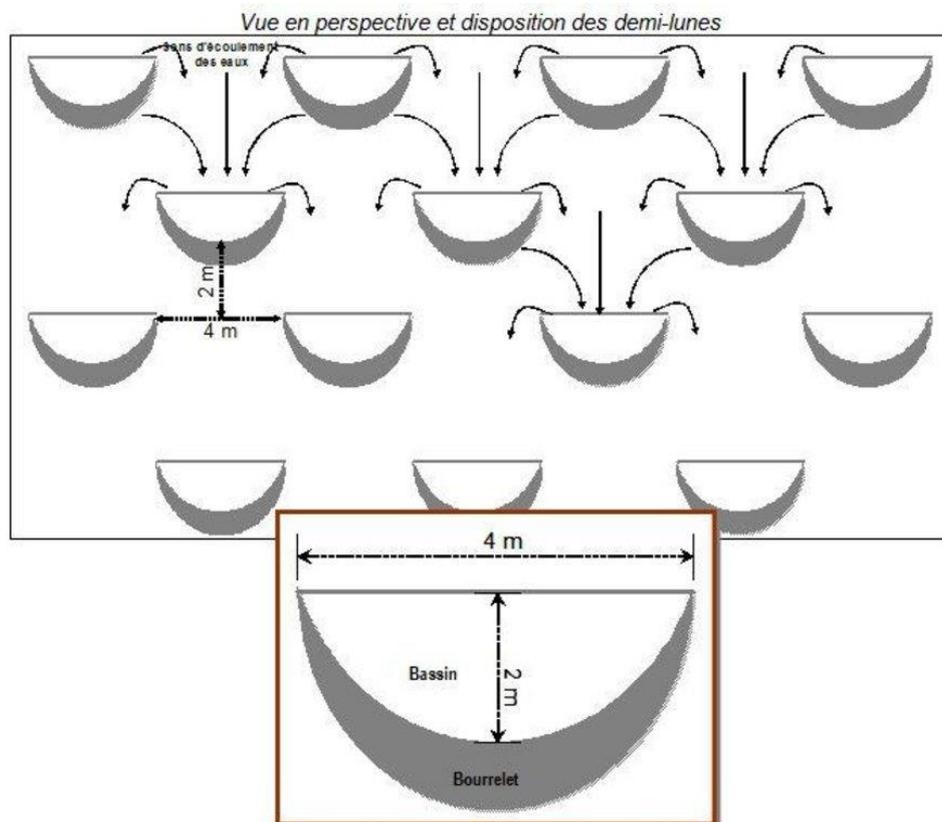


Figure 1-6: Dessin technique de la technologie des demi-lunes (WOCAT, 2014)

Performances : La combinaison demi-lune et fumier donne une production variant entre 1,2 à 1,6 t/ha de grains. Les rendements de la demi-lune seule sont multipliés par 15 à 24 avec l'apport de compost. Les apports d'amendements organiques non encore décomposés (paille) associés au Burkina Phosphate fournissent des productions moyennes de l'ordre de 0,6 t/ha de grains de sorgho local. (Zougmoré and Zida, 2000; R Zougmoré et al., 2003)

Zones d'adoption, contexte agro-écologique et contraintes liées à la mise en œuvre de la pratique : La technique de demi-lune est largement adoptée au Burkina Faso, au Mali, en Mauritanie, au Niger, au Sénégal et au Nigéria (WOCAT, 2010; Maisharou et al., 2015). La demi-lune est bien adaptée à la zone sahélienne entre les isohyètes 400 à 600 mm. La technique nécessite une main-d'œuvre importante et la disponibilité de la matière organique. La dénudation et l'encroûtement sont les traits spécifiques pour la mise en place des demi-lunes généralement sur les glacis et non dans les bas-fonds.

d) La bande enherbée

Description : La réalisation des bandes enherbées (**Figure 1-8d**) a pour objectif de mettre en place des barrières antiérosives qui puissent constituer des compléments ou des alternatives dans les zones où les carrières de moellons ne sont pas disponibles pour la réalisation des cordons pierreux. Elles constituent une technologie adaptée pour l'amélioration de l'alimentation hydrique des cultures par la réduction de la vitesse de ruissellement et l'atténuation des effets de la sécheresse sur la productivité des sols. Elles permettent également d'accroître la disponibilité de biomasse herbacée pour les besoins d'alimentation du bétail et de fertilité du sol.

Caractéristiques techniques : La bande enherbée est une barrière biologique jouant le même rôle que le cordon pierreux dans le contrôle du ruissellement et de l'érosion des sols avec l'avantage supplémentaire de produire de la paille ou du fourrage pour le producteur. La technique consiste à installer ou laisser sur place une bande végétative (naturelle ou installée) d'espèces pérennes de largeur assez importante sur les courbes de niveau de manière à pouvoir réduire le ruissellement et favoriser l'infiltration de l'eau. Les espèces couramment utilisées dans le cas de l'installation des bandes enherbées sont : *Andropogon gayanus*, *Andropogon ascinodis*, *Cymbopogon ascinodis*, *Vetiveria zizanioides*. L'installation des bandes enherbées se fait suivant les courbes de niveau pour freiner les eaux de ruissellement comme les cordons pierreux. La largeur de la bande enherbée varie entre 20-30 cm et sur chaque bande est installée 1 à 4 lignes d'herbes. Les graines sont plantées en début de saison de pluie. La bande doit être assez dense, sans brèche sur toute la ligne. L'expérience montre que le repiquage des jeunes plantes est plus efficace que les semis directs. L'espacement entre les bandes est compris en 20 et 80 m. En général, il faut éviter les zones inondables (WOCAT, 2014). La **Figure 1-7** présente un dessin technique de l'implémentation de la technologie de la bande enherbée.

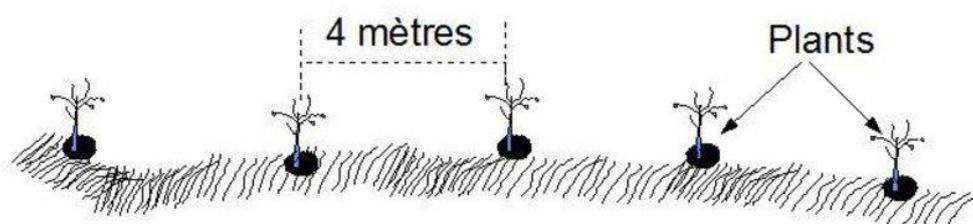
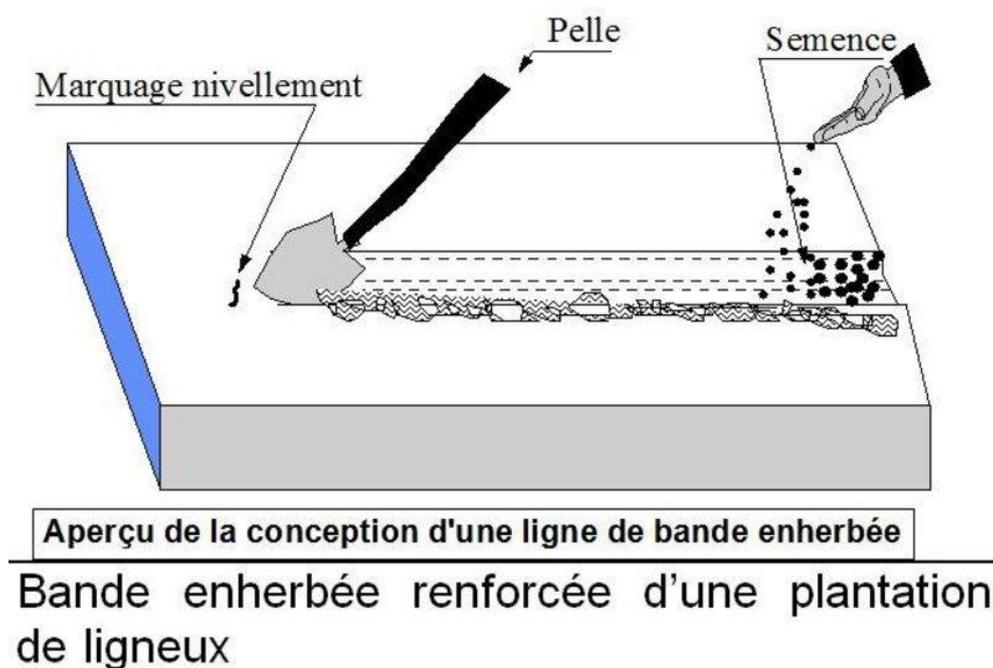


Figure 1-7: dessin technique de la technologie des bandes enherbées renforcée d'une plantation de ligneux espacée de 4 mètres. Source : (WOCAT, 2014)

Performances : Les bandes enherbées jouent le même rôle que les cordons pierreux avec des résultats similaires. Les bandes enherbées à *Andropogon gayanus* permettent de réduire le ruissellement de 51 %. L'application du compost en combinaison avec les bandes enherbées augmente le rendement de l'ordre de 142 % contre 65 % avec l'utilisation exclusive d'engrais minéraux (Zougmoré, 2003). Les bandes enherbées constituent des sources de production de fourrage pour les animaux et de paille nécessaire pour la confection des seccos. La diversité des usages de cette végétation herbacée confère à cette pratique un rôle important en milieu paysan (renouvellement des toitures, confection de greniers, de hangars, de nattes, etc.).

Zones d'adoption, contexte agro-écologique et contraintes liées à la mise en œuvre de la pratique : La technique est adoptée au Burkina Faso, au Mali, au Niger, au Sénégal et au Nigéria (WOCAT, 2010; Maisharou et al., 2015). Elle est bien adaptée sous tous les climats pour réduire l'érosion et améliorer l'infiltration des sols. Les bandes enherbées se pratiquent

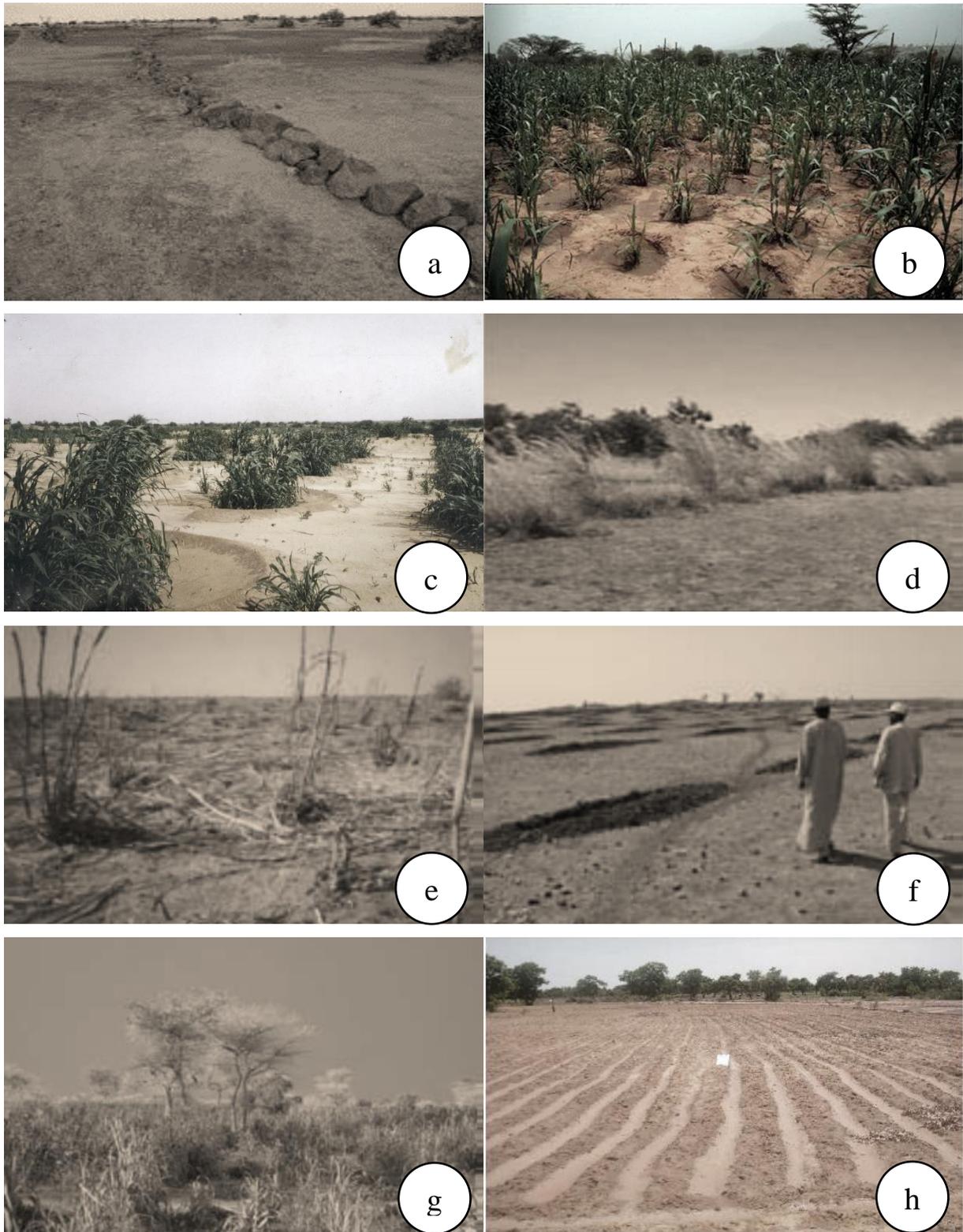
sous tous les types de sols à l'exception des sols indurés superficiels qui ne favorisent pas l'enracinement.

En plus des techniques ci-dessus présentées, il existe encore bien d'autres techniques CES comme le paillage, la tranchée Nardi, la Régénération Naturelle Assistée, le labour à plat ou cloisonné.

e) Autres techniques CES/DRS

- **Le paillage:** Le paillage (Figure 1-8.e) est une technique ancienne utilisée pour améliorer les conditions du sol en épandant des matières végétales (paille, tige, feuilles, etc.) ou d'autres déchets, sur des surfaces cultivées ou prévues. La quantité requise varie de 2 t/ha par an à 6 t/ha tous les 3 ans, en fonction de l'état du sol et de la disponibilité du fumier et du compost. Il permet la conservation du sol et le maintien de la fertilité du sol. L'utilisation du compost et du fumier améliore les rendements des cultures. Confirmé pour être efficace lorsque les précipitations sont insuffisantes, le paillage n'augmente pas de manière significative les nutriments du sol, mais améliore l'humidité. Il est pratiqué au Burkina Faso, au Mali, en Mauritanie, au Niger, au Nigeria et au Sénégal (Hien et Slingerland, 1998; Lamers et al., 1998; Maisharou et al., 2015).
- **La tranchée Nardi (Figure 1-8.f):** Les tranchées Nardi (appelées aussi tranchées Valerani) sont réalisées à l'aide d'une charrue spécifiquement conçue à cet effet et remorquée par un tracteur. La charrue Nardi ouvre un sillon perpendiculairement à la pente en mettant le bourrelet en aval, créant ainsi un obstacle en aval du sillon. Selon la pente et la nature du sol, le nombre de tranchées peut varier. Le nombre recommandé de micro-captages pour un terrain plat est compris entre 250 et 400 par hectare, les rangées étant espacées de 5 à 7 m; et pour les pentes plus raides, les rangs doivent être espacés de 3 à 4 m, avec une densité de 600 micros captages par hectare. Elle est efficace en cas de faible pluviométrie, car les micro-captages collectent le peu d'eau de pluie disponible pour les plantes qui y poussent. Elle peut étendre et améliorer la qualité des forêts et la quantité de pâturages pendant les années de sécheresse. Elle est pratiquée au Burkina Faso, au Mali, en Mauritanie, au Niger, au Nigeria et au Sénégal (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015; WOCAT, 2019).

- **Régénération naturelle assistée (RNA)** : La RNA (Figure 1-8.g) est une technique agro-forestière qui consiste à protéger et entretenir les espèces ligneuses poussant naturellement dans un champ. Il s'agit de sélectionner et de laisser des jeunes pousses naturelles. Dans les champs, une densité de 60 à 80 pieds par ha est recommandée. Il est important de protéger les jeunes pousses contre le broutage des animaux durant les premières années pour réussir l'implémentation de la technique. Le choix des essences d'arbres se fait en fonction des objectifs poursuivis par les paysans (pâturage aérien pour les animaux, ventes des fruits ou des sous-produits (karité, néré, pharmacopée, etc.). La technique permet aux agriculteurs de protéger et de gérer la régénération des arbres et des arbustes indigènes parmi leurs cultures. Les agriculteurs l'adoptent pour accroître leur résilience aux impacts du changement climatique en restaurant leurs terres, ce qui se traduit par de meilleurs rendements céréaliers et de nouveaux moyens de subsistance, dont le bois de feu, le fourrage, les fruits et les feuilles comestibles. Elle est pratiquée au Burkina Faso, au Mali, en Mauritanie, au Niger, au Nigeria et au Sénégal (Larwanou et Adam, 2008; Maisharou et al., 2015).
- **Le labour à plat ou cloisonné (Figure 1-8.h)** : C'est une technique qui consiste à briser la croûte superficielle du sol à l'aide d'une charrue à traction animale. Elle permet de récupérer les sols glacés à faible infiltration. La technique consiste à confectionner des sillons cloisonnés en cassant la couche superficielle d'un sol colmaté afin d'améliorer la capacité d'infiltration, réduire le ruissellement, l'érosion et collecter les eaux et les éléments minéraux dissous pour améliorer la fertilité des sols et favoriser la régénération. Le labour à plat est réalisé avant le semis. Le labour se pratique sous tous les climats et sur tout type de sols à l'exception des sols légers comme les sols peu évolués superficiels. La technique est adoptée au Burkina Faso, au Mali, au Niger, au Nigeria et au Sénégal (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015).
- **La culture associée** : Le système consiste à cultiver plusieurs espèces végétales sur une même parcelle en même temps. Le but étant de combiner divers services des plants (fertilisation, action répulsive des insectes ou des mauvaises herbes, action de stockage de l'eau du sol) pour une productivité agricole élevée, un meilleur contrôle des parasites et des maladies, des services écologiques améliorés et une grande rentabilité économique (Malézieux et al., 2009; Hernández and Phélinas, 2012).



*Figure 1-8 : Différents types de techniques de conservation des eaux et des sols adoptées en zones Sahélienne
Le cordon pierreux (a), le Zai (b), la demi-lune (c), la bande enherbée (d), le paillage (e), la tranchée Nardi (f), la RNA (g)
et le labour à plat (h).*

5.1.2. Impacts des techniques de conservation des eaux et des sols sur la productivité agricole et la performance hydrologique

Les techniques CES, sont connues pour leurs capacités à réduire le ruissellement, à améliorer l'infiltration, à réduire l'évaporation et améliorer le stockage de l'eau dans la zone racinaire des cultures (Ngigi, 2003; Zouré et al., 2019). Dans les régions du Sahel, où les sols sont compacts, encroutés, avec de faibles teneurs en matière organique, des techniques CES appropriées ont joué un rôle crucial depuis les années 1980 dans l'amélioration de l'infiltration et de la conservation de l'humidité tout en garantissant une production agricole durable (Hoogmoed, 1999; Nyamekye et al., 2018). Au Burkina Faso, le développement de la technique de Zaï a permis aux paysans de réhabiliter les terres dégradées incultes. Ainsi, le rendement agricole qui était nul est passé de 400 kg/ha pendant les années de faibles pluviométries à 1500 kg/ha pendant les années de bonnes précipitations (Kaboré et Reij, 2004). Le même constat a été fait en Tanzanie avec des rendements de 1850 kg/ha (Maisharou et al., 2015). L'humidité maximale mesurée autour des poquets confirme l'efficacité de la technique à concentrer les faibles quantités de pluie en eau disponible pour les plantes. En Éthiopie, une étude conduite sur 3 ans a révélé que le buttage et le sous-solage avaient augmenté le stock d'eau en zone racinaire de 24% et 3% respectivement par rapport au labour traditionnel (McHugh et al., 2007). Une expérience de terrain conduite au Burkina Faso a révélé que le rendement de grain et de paille avait doublé sur les parcelles avec cordon pierreux comparé à celui d'un semis direct à la daba. La teneur en eau diminuait avec l'augmentation de l'espacement entre les cordons pierreux (Zougmore et al., 2000a). Dans une zone semi-aride du Burkina Faso, où la production de sorgho sans techniques CES est très difficile, la technique de demi-lune permet d'atteindre des rendements compris entre 900 et 1600 kg/ha (Zougmore et al., 2003). Le zaï au Burkina Faso a également permis de doubler les rendements grains (Fatondji et al., 2009). Plus de 5000 ménages ont adopté le zaï dans la province du Boulgou au Burkina Faso (WOCAT, 2007). Dans une autre étude menée au champ au Burkina Faso, l'irrigation d'appoint a augmenté les récoltes de sorgho de seulement 56%, mais en combinaison avec des engrais supplémentaires, de 208% (Fox et Rockström, 2003). L'effet des pratiques CES sur la productivité de l'eau et des cultures dépend du régime pluviométrique. Au cours des années où les précipitations ont été bien réparties au Sahel, les mesures CES sans apport de nutriments ont eu peu d'influence sur les rendements des cultures (R. Zougmore et al., 2003). Par conséquent, au cours des années où les précipitations ont été bien réparties, l'application de nutriments seuls a permis d'obtenir des rendements en grain beaucoup plus élevés que les mesures CES sans apport d'éléments nutritifs.

Mugabe (2004) a indiqué que la différence de teneur en eau du sol entre les tubes d'accès à différentes distances des fosses de zai était plus élevée pendant les périodes sèches, lorsque les tubes situés plus près des fosses présentaient un meilleur état de l'eau dans le sol. Malgré l'effet bénéfique des billons pendant les années de précipitations normales (500-600 mm), en années humides (700-900 mm), des effets d'engorgements ont été observés sur le maïs en Tanzanie (Jensen et al., 2003). Par conséquent, des applications d'engrais plus importantes ont été recommandées pour atténuer l'humidité excessive pour augmenter la perte d'eau par transpiration. Les résultats (**Tableau 1-1**) ci-dessous obtenus au Burkina Faso démontrent que les techniques CES réhabilitent les terres dégradées et augmentent considérablement la productivité agricoles.

Tableau 1-1: Impact des certaines techniques CES sur le rendement de sorgho dans certaines régions du Burkina Faso. Source (Nyamekye et al., 2018)

Périodes	Technique CES	Localité/ Province/ Région	Rendement sorgho (kg/ha)	Références
2004 – 2006	Zai	Tougou	428 – 482	(Barbier et al., 2009)
2006 – 2008	Zai	Leeba/Yatenga	900 – 1200	(Sawadogo, 2011)
2006 – 2008	Cordon-pierreux	Leeba	700 – 1100	(Sawadogo, 2011)
1984 – 2004	Demi-lune	Nord-Ouset	1400 – 2000	(Sawadogo, 2011)
1982 – 1984	Cordon-pierreux	Nord	500 – 1000	(Morris and Barron, 2014)
1980 – 1988	Zai/Cordon-pierreux/ demi-lune	Nord et Sahel	600 – 700	(Maatman et al., 1998)
1986 – 2000	Zai/ demi-lune	Sahel	1000 – 1500	(Zougmore et al., 2004c)
1984 – 2001	Zai/cordon-pierreux/demi-lune	Centre nord et Nord	611 – 793	(Zougmore, 2003)
1975 - 1985	Zai	Plateau central	400 – 500	(AFSA, 2015)

Il ressort que pour assurer une productivité agricole durable et satisfaisante, les sols doivent être aménagés avec un apport conséquent d'amendements organiques. Toutefois, comme l'effet des techniques CES sur l'amélioration de l'état hydrique et du rendement des cultures dépend du climat et du type de sol, des tests locaux sont nécessaires avant que la méthode ne soit plus largement appliquée.

5.1.3. Impacts des techniques de conservation des eaux et des sols sur les propriétés du sol

La dégradation de la qualité des sols est induite par l'érosion hydrique et éolienne, la baisse de la matière organique et des éléments nutritifs du sol, le compactage du sol, l'acidité du sol et la diminution de l'activité microbienne (Bezdicek et al., 2003). Ce phénomène réduit le potentiel de stockage de l'eau du sol. Par conséquent, le maintien de la qualité des terres est essentiel pour une productivité durable des sols. Diverses études conduites dans la zone sahélienne ont montré que les techniques CES/DRS permettraient d'améliorer les propriétés physiques du sol, de réduire l'érosion et d'améliorer la perméabilité des sols (Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2004a; Kagambèga et al., 2011), mais il existe relativement peu d'information sur leurs rôles dans la modification des éléments nutritifs du sol, en particulier l'activité biologique. Cependant quelques travaux récents comme ceux de (Kagambèga et al., 2017) menés au centre nord du Burkina Faso sur trois années de suivi montrent que les techniques de labour à plat, le zaï et la demi-lune améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols encroutés. Ces auteurs, ont noté une incidence significative des techniques sur la texture du sol, une contribution à améliorer la teneur en carbone organique total, en azote total, en calcium, en magnésium, en phosphore ainsi qu'une régulation du pH et de l'activité microbienne du sol. Ces résultats suggèrent que les techniques assurent la disponibilité des éléments nutritifs du sol et que le carbone organique, le pH et le phosphore sont les facteurs qui entretiennent l'activité microbienne.

5.1.4. Conditions pour la mise en œuvre des techniques de conservation des eaux et des sols

Les techniques CES sont mises en œuvre sur le terrain en tenant compte des risques liés à la topographie (ravinement, ensablement, érosion en nappe, etc.), du type de culture (mil, sorgho, maïs, etc.) et du contexte agro-écologique (pentes de colline, glacis et bas-fonds, état de surface, zone climatique). Les unités topographiques ont différents types de sol, de végétation, d'usages et sont souvent exploitées pour divers besoins (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015). **La Figure 1-9** présente le schéma d'une toposéquence typique des zones sahéliennes.

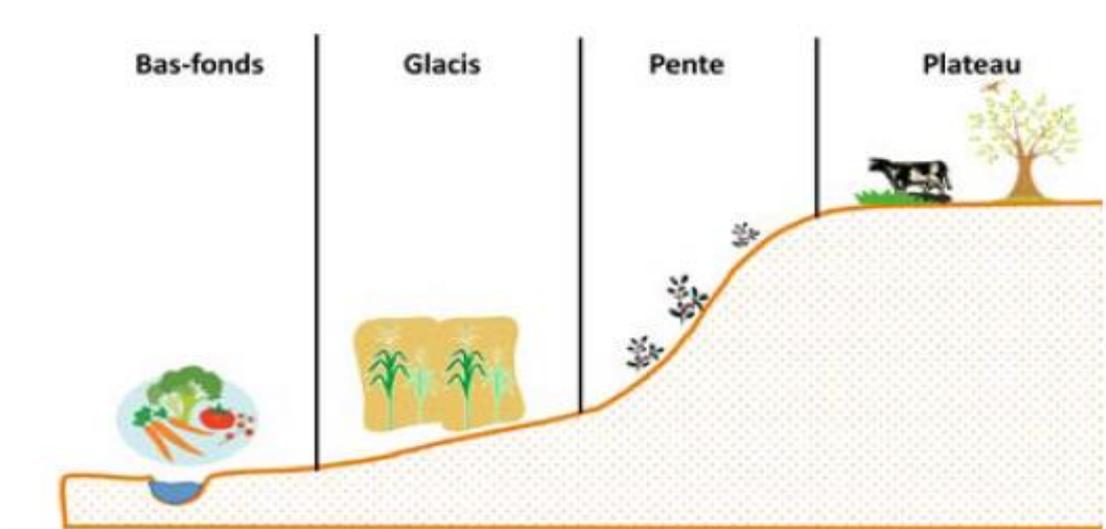


Figure 1-9: Schéma d'une toposéquence typique des zones sahéliennes. Source : Dörlochter-Sulser et Nill, 2012

Les zones du plateau : Ce sont des propriétés communales avec des sols caillouteux et des affleurements de cuirasse, peu profonds et peu fertiles. Les utilisations incluent le pâturage pour le bétail et la collecte du bois, de la paille, des fruits, de l'écorce, etc. Les terres et la végétation sur le plateau sont souvent gravement dégradées en raison de leur utilisation excessive. Les risques encourus sont l'érosion en nappe, le ravinement et l'érosion éolienne.

Les pentes : Elles sont constituées de sols peu profonds et caillouteux, recouverts d'herbe et de brousse. Les eaux de ruissellement qui coulent sur le plateau et les pentes plus abruptes évacuent les ravines et provoquent des glissements de terrain, ce qui entraîne une grave dégradation des versants. Ces zones sont d'une utilité limitée en tant que parcours communal pour le bétail.

Les glacis : Ce sont des zones en pente douce avec des sols plus profonds et plus fertiles. Ce sont les principales zones utilisées pour les cultures pluviales. Les cultures sont essentiellement vivrières. Ce type de terrain est sujet à l'érosion en nappe et en ravines causée par le ruissellement de surface qui coule sur le plateau et le long des pentes.

Les bas-fonds : Les sols sont profonds et plus fertiles enrichis par des éléments fertilisants provenant des zones en amont. Les bas-fonds sont utilisés pour faire pousser des cultures vivrières pendant la saison des pluies. Le flux d'eau concentré provenant des zones en amont peut menacer gravement les bas-fonds. Bien qu'il transporte des sédiments fertilisants, il peut aussi causer des érosions de ravine et l'envasement des terres et d'autres infrastructures hydro-agricoles.

Pour l'application des techniques CES, il n'y a pas de solution technique unique. Il est nécessaire de déterminer les pratiques les plus appropriées dans chaque cas, en tenant compte de la topographie des terres à aménager et des utilisations ultérieures des terres. Par conséquent, une évaluation du bassin versant dans son ensemble est faite pour choisir une combinaison de techniques et de pratiques adaptées aux conditions agro-écologiques spécifiques de la zone (pluviométrie, topographie, propriétés et structure du sol, type de dégradation, couverture végétale, etc.), qui doivent également être réalisables avec les moyens des agriculteurs.

- **Le zaï** est creusé dans les terres dégradées qui ne sont plus cultivées par exemple les plateaux et les glacis à pente faibles (0-5%) et encroutées (érosion et gravillonnaire) en zone pluviométrique inférieure à 800 mm/an. Le zaï, n'est pas recommandé pour les terres sablonneuses et dans les bas-fonds. Les sols sablonneux sont inappropriés à cause de la mauvaise stabilité structurale, la faible capacité de rétention en eau et le risque de comblement des trous. Dans les bas-fonds le zaï risque d'être inondés (WOCAT, 2017a). Il permet ainsi de réduire les risques d'érosion (hydriques et éoliennes) et de stress hydriques en zones climatiques Sahélienne à Soudanienne (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015; WOCAT, 2017a).
- **Les cordons pierreux** sont applicables sur toutes les toposéquences (Bas-fonds, plateaux/glacis et Pente de colline) dans les zones sahéliennes et soudanaises recevant entre 300 et 900 mm d'eau par an sur des terrains à pente faible (0-5%) et modérée (5-10%). Les pentes modérées à onduleuses sont caractéristiques des pentes de collines. Lorsque la pente est faible, les écartements entre cordons pierreux sont importants (Zougmore et al., 2000a). Sur les glacis et les pentes de collines, les cordons pierreux peuvent être sujets à des déficits hydriques en années de faibles pluviométries à cause des pertes d'eaux par ruissellement, contrairement à son application en zone inondable. Ils sont recommandés sur des sols à texture limoneuse ou argileuse. La technique permet de lutter contre l'envasement, les inondations et l'érosion dans les bas-fonds, mais sur les glacis et les pentes de collines, elle limite majoritairement l'érosion et le stress hydrique (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015; WOCAT, 2017b).
- **Les demi-lunes** s'utilisent sur les sols dégradés, encroûtés (croûtes ERO et GRA). La dénudation et l'encroûtement sont les traits spécifiques pour la mise en place des demi-lunes généralement sur les glacis et surtout pas dans les bas-fonds à cause des risques d'inondations. Les demi-lunes sont utilisées en climat sahélien et soudano-sahélien entre les isohyètes allant de 400 à 600 mm. Les sols sablonneux sont inappropriés à cause de

la mauvaise stabilité structurale, la faible capacité de rétention en eau et le risque de comblement des trous. Elles permettent d'éviter le stress hydrique et l'érosion (Dörlochter-Sulser et Nill, 2012; Maisharou et al., 2015; WOCAT, 2016b).

- La taille et les espacements des demi-lunes et du zaï varient en fonction du type de sol : Elles sont plus grandes sur les sols gravillonnaire (sols peu profonds, peu perméables avec une capacité de stockage en eau limitée) que sur les sols sablo-argileux ou limoneux argileux (bonne capacité de stockage de l'eau). La taille et l'espacement plus important sur les sols gravillonnaires permettent de collecter beaucoup plus d'eau pour la plante (Dörlochter-Sulser and Nill, 2012).

5.2. Adaptation variétale : Cas du mil (*Pennisetum glaucum*)

Parmi les céréales utilisées dans la zone d'étude, le mil est la culture la plus adoptée par les paysans (Barbier et al., 2009). Dans le souci d'assurer une sécurité alimentaire pour l'Homme et le bétail dans un contexte de changement climatique et de pression démographique dans les zones arides, le mil est de plus en plus exploité pour ses grains et son fourrage (Vall et al., 2008; Hiernaux et al., 2014). C'est une céréale hautement adoptée et appréciée par les populations du Sahel à cause de sa résistance à la sécheresse et à sa tolérance aux sols sableux acides et peu fertiles. Il est plus plastique que le sorgho et le maïs, renferme un goût agréable et riche en protéines, minéraux et en énergie (Andrews et al., 1993; Bélair et al., 2005). À l'échelle mondiale, le mil occupe la 6^{ème} place parmi les céréales (JAICAF, 2009) et par ordre d'importance décroissante en Afrique, le mil est produit au Nigéria, au Niger, au Burkina Faso, au Tchad, au Mali, en Mauritanie et au Sénégal (Hamadou et al., 2017). Ainsi, le mil représente une céréale de base pour les populations du Sahel.

Dans une description plus détaillée, le mil est une graminée annuelle de la section des *Penicillaria* du genre *Pennisetum* de la famille des *Poacea*, sous famille *Panicoideae* (Tostain and Marchais, 1993). Le cycle végétatif du mil est composé de trois phases. La phase végétative dure 30 à 50 jours et comprend la germination, l'apparition des plantules et l'initiation de la plantule. La phase reproductive qui comprend l'épiaison, la floraison et la fructification. La phase de maturation caractérisée par la maturité de la plante. Au cours de cette période très sensible à la sécheresse, le grain passe par les stades laiteux, pâteux, dur et enfin mature (Loumerem et al., 2004; Doto, 2016). Le cycle précoce à une longueur de 60 à 95 jours, et la

variété tardive évolue entre 100 et 180 jours (Loumerem et al., 2004). Le rendement moyen du mil au champ est de 0.4 t/ha contre 2.5 t/ha en parcelles contrôlées (JAICAF, 2009).

6. Conclusion partielle

L'agriculture joue un rôle prépondérant dans l'économie des pays sahéliens et contribue fortement à la sécurité alimentaire des ménages agricoles. Cependant, le Sahel est confronté à une pression anthropique compromettant ainsi son développement socio-économique. Cette dégradation est essentiellement due à l'action anthropique et climatique entraînant une perte du potentiel de production des sols. En effet, le Sahel est perturbé par une grande variabilité climatique alternant inondation et sécheresse et une forte exploitation des ressources naturelles par les hommes. Selon les informations scientifiques disponibles et récentes, la dégradation des terres entraîne une diminution de la capacité de rétention en eau des sols, un accroissement des écoulements, et une récupération importante des eaux par évapotranspiration. Cette modification du bilan hydrologique des sols est à l'origine de plusieurs problèmes que vivent les régions des zones arides : inondation, baisse des rendements agricoles, famine, etc. Ainsi, pour faire face à cette situation, les paysans des zones sahéliennes ont adopté des technologies agricoles innovantes qui permettent de restaurer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dégradés dans le but d'accroître les rendements agricoles. Dans ce contexte décrit ci-dessus, la compréhension des processus hydrologiques des pratiques agricoles est un enjeu scientifique et sociétal majeur. Elle permettra de proposer des techniques plus résilientes dans un contexte de changements climatiques. Le chapitre suivant porte sur la description physique et socio-économique de la zone d'étude. Il justifie le choix de la zone d'étude et présente une synthèse des études précédentes qui ont concerné cette localité située en zone sahélienne burkinabè. Il présente également le dispositif expérimental et le protocole de mesure.

Chapitre 2 : Zone d'étude, site expérimental et protocole de mesure

1. Introduction

La zone d'étude se situe dans la ceinture sahélienne d'Afrique de l'Ouest et plus précisément dans le Sahel burkinabé. Dans cette zone du Burkina Faso, l'action conjuguée de l'homme et du climat ont accéléré la dégradation de l'environnement avec pour conséquence un encroûtement des sols. Le Sahel est la ceinture semi-aride de terres stériles, sablonneuses, jonchées de pierre, qui s'étend sur 3 860 km sur toute la largeur du continent africain qui marque la séparation physique et culturelle entre la région sud du continent, plus fertile, et le désert du Sahara (Frappart et al., 2009). Cette ceinture sahélienne, d'une superficie d'un peu plus de 3 millions de km² est caractérisée par des précipitations faibles et irrégulières. Les changements environnementaux sont des obstacles majeurs au développement socio-économique des producteurs du Sahel burkinabè (Duponnois et Dia, 2013; Nyamekye et al., 2018).

Pour cette étude, le bassin versant de Tougou situé au Nord du Burkina Faso a été choisi comme site représentatif des hydrosystèmes sahéliens. Ce chapitre porte sur la description physique et socio-économique de la zone d'étude d'une part, et d'autre part sur la présentation du dispositif expérimental et le protocole de mesure des paramètres hydrométéorologiques et hydrodynamiques des sols.

2. Cadre naturel et physique

2.1. Localisation du bassin versant de Tougou

Le bassin versant de Tougou est situé au nord du Burkina Faso dans la province du Yatenga (département de Namissiguima). D'une superficie de 37 km², il est délimité entre les latitudes 13.62° et 13.69° Nord et les longitudes 2.21° et 2.31° Ouest. Les coordonnées géographiques de son exutoire sont : 13.68° Nord et 2.21° Ouest. L'accès au site, à partir 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 dont le bassin porte son nom. Ce bassin englobe trois villages, dont Basnéré situé en amont, Faogodo au centre et Tougou en aval (**Figure 2-1**).

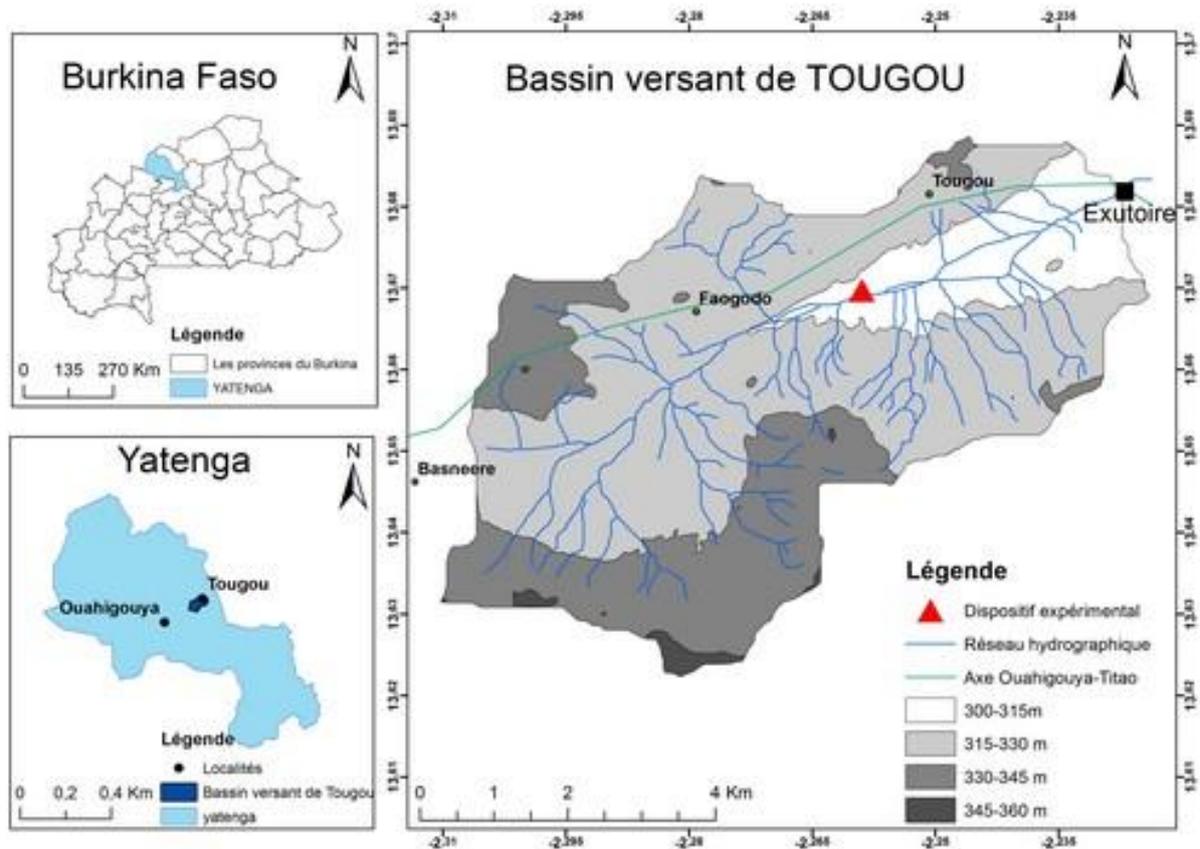


Figure 2-1: Localisation du site expérimental dans le bassin versant de Tougou (Base de données nationale topographique numérique, BNDT, 2002)

2.2. Climat et hydrographie

La zone d'étude est localisée dans la partie sahélienne du Burkina Faso (Mounirou, 2012). Le climat est régi par les déplacements du front intertropical (FIT) qui est une opposition de l'harmattan (vent frais et sec) de direction Nord-sud et de la mousson (vent chaud et humide) de direction Sud-Nord. Le climat de la zone est caractérisé par une saison sèche allant de novembre à mai dominée par l'harmattan et une saison humide de juin à octobre dominée par la mousson. Le bassin se situe entre les isohyètes 550 et 750 mm (CountryStat, 2013). Les pluies sur le bassin se caractérisent par de fortes intensités, une forte variabilité dans le temps et dans l'espace et une faible abondance (Mounirou, 2012). Ces pluies sont à l'origine d'une forte érosion, et d'une productivité agricole très précaire. La pluviométrie moyenne annuelle est de 630 mm et l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle est de 2090 mm pour la période 1961-2009 (Agence Nationale de la Météorologie du Burkina). Les températures moyennes mensuelles à Ouahigouya varient de 18°C (minima) à 42°C (maxima). La **Figure 2-2** présente l'évolution des précipitations et de l'évapotranspiration mensuelles à la station synoptique de Ouahigouya sur la période 1961-2009. Elle montre des déficits hydriques

mensuels importants excepté les mois de juillet et août. La **Figure 2-3** présente l'évolution des Indices de Précipitations Standardisés (IPS) à la station de Ouahigouya. On observe une forte variabilité interannuelle (le coefficient de variation est de 152 mm) des cumuls pluviométriques annuels et une longue période de sécheresse entre 1970 et 1994, les indices de précipitations standardisés étant compris entre - 0.5 et -1.5 (McKee et al., 1993). Les vents sont fréquents avec des vitesses variables, selon la période de l'année : en moyenne 2 à 8 m/s en saison pluvieuse et 0 à 3 m/s en saison sèche. (Mounirou, 2012).

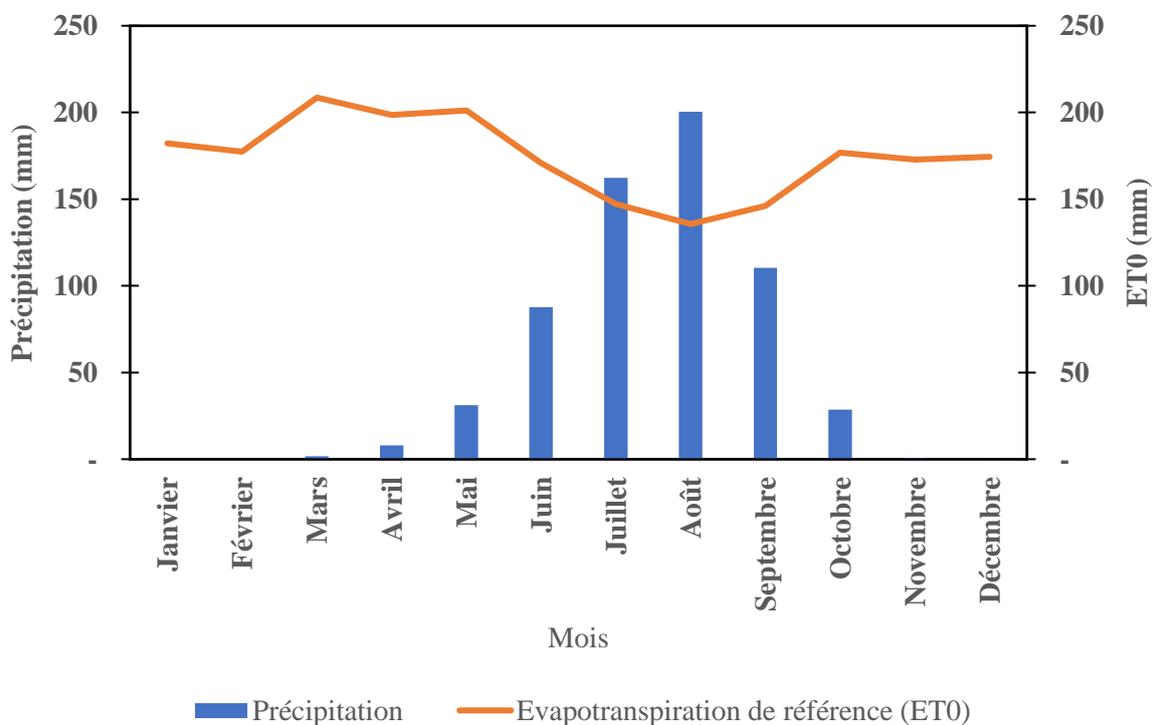


Figure 2-2 : Diagramme climatique issu des données climatiques de la station de Ouahigouya durant la période 1961-2009 (Source : Agence Nationale de la Météorologie du Burkina)

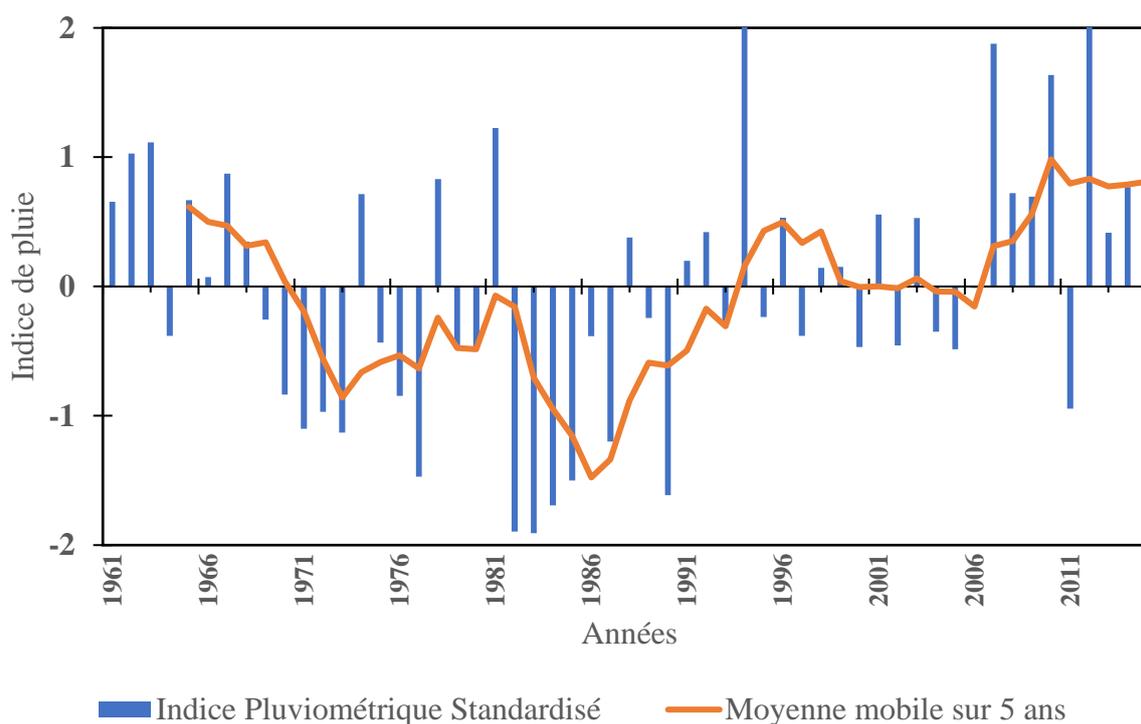


Figure 2-3: Évolution interannuelle de l'indice de pluie standardisée à Ouahigouya durant la période 1961-2015

Le bassin versant de Tougou est marqué par un réseau hydrographique peu dense et caractérisé par des cours d'eau à écoulement temporaire à l'image de la zone sahélienne. Le réseau hydrographique est essentiellement constitué de ruisseaux et rigoles qui serpentent dans l'ensemble du bassin versant et canalisent les eaux vers le cours d'eau principal qui est la rivière Bilampouanga. Elle a une longueur d'environ 8 km et se jette dans le barrage de Tougou. La profondeur du lit mineur de ses axes d'écoulement varie entre 1 m et 2 m et leur fond plat se raccorde à des berges plus ou moins redressées, ce qui confère aux lits une forme généralement en « U » (Diello, 2007; Mounirou, 2012). D'après les études de Mounirou, (2012), le débit mensuel maximum du bassin de Tougou sur la période 2004-2010 est atteint au mois d'Août et sa valeur est de 0.928 m³/s. Les exportations solides ont été respectivement de 4.1 t/ha en 2010 et de 2.2 t/ha en 2011 avec des pertes de carbones 2 à 3 fois plus importantes sur les sols dégradés comparativement aux sols cultivés (Mounirou, 2012; Maïga-Yaleu, 2014). L'analyse des données hydrométriques a révélé l'extrême variabilité des réponses du bassin versant à un événement pluvieux (Mounirou, 2012). Le ruissellement est généré par la pluie totale et son intensité maximale à 30 minutes. Le processus dominant est le ruissellement hortonien.

2.3. Géologie et géomorphologie

Le substratum géologique du bassin est constitué principalement d'affleurements de roches acides tels que les granites, les migmatites et les gneiss. Le bassin repose sur du socle schisteux et dispose d'une série volcano-sédimentaire du Birimien composé essentiellement de métasédiments argileux à argilo-gréseux. Le nord de Tougou est marqué par la présence de dyke méta basique intrusif affleurant sur la ligne de partage des eaux. La lithologie du bassin se compose en terme général d'une première couche de cuirasse latéritique, suivie d'une couche d'altération argileuse et enfin la roche saine (IWACO, 1990).

La géomorphologie du bassin présente un relief très peu accidenté constitué de buttes, de collines cuirassées de faibles altitudes et des glacis représentatifs des surfaces fonctionnelles (BUNASOL, 2004). L'exutoire du bassin versant de Tougou est à 300 m d'altitude et le point culminant à 360 m. La pente globale du bassin est de 1% (Mounirou, 2012). La morphologie présente un glacis d'épandage qui n'est pas bien développé sauf dans sa partie amont. Avec une altitude moyenne estimée à 340 m, la géomorphologie du bassin versant de Tougou est une succession de sommets et de reliefs bas reliés entre eux par des zones de transition plus ou moins régulières dans leur forme (Koussoubé, 2007; Mounirou, 2012).

2.4. Sols et végétation

Trois types de sols ont été mis en évidence dans le bassin versant de Tougou : les sols ferrugineux tropicaux lessivés, les lithosols et les sols peu évolués. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés formés sur les matériaux de type kaolinitique issus de roches acides (BUNASOL, 2004) sont caractérisés par leur teneur élevée en oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse qui se trouvent régulièrement sous forme figée (cuirasse) et ont en outre un complexe colloïdal dominé par les argiles. Ils sont caractérisés par une décomposition rapide de la matière organique et présentent dans leurs horizons superficiels des taux de limon et de sable élevés et un taux d'argile faible. On les rencontre généralement sur les pentes moyennes et dans les zones de plaine (Maïga-Yaleu, 2014). Les lithosols sont des sols superficiels très peu épais avec un recouvrement gravillonnaire et occupent les sommets et les versants raides des buttes et les collines dont la dalle cuirassée connaît un processus de désagrégation mécanique ainsi que les hauts de pente de glacis. Quant aux sols peu évolués, on les rencontre généralement sur les pentes moyennes et dans les plaines. Ils sont caractérisés par une texture sableuse à sablo argileuse et une structure à cohésion faible (Mounirou, 2012).

La végétation du bassin de Tougou est principalement composée de deux grandes formations : les steppes (herbeuses et arbustives) et les territoires agroforestiers. Les steppes sont constituées de formations ligneuses et graminéennes recouvrant très peu le sol. On les retrouve sur les buttes des versants, les collines, les bas de glacis et les vieilles jachères. Le tapis herbacé est discontinu et de taille basse, inférieure à 80 cm de hauteur. Quant aux territoires agroforestiers, leur couvert végétal est plus ou moins dense. Les bas-fonds et les bordures des cours d'eau sont habités par ces territoires (Koussoubé, 2007; Thiombiano et Kampmann, 2010). La végétation (herbacée et arbustive) est en voie de disparition dans les zones fortement dégradées et couvre moins de 5% de la superficie des sols (Duponnois et Dia, 2013). Les causes sont dues aux besoins en bois de chauffe pour les populations en forte croissance et à la pression du bétail sur les ressources fourragères. Par conséquent, les sols se dégradent rapidement générant la formation de croûtes superficielles très imperméables aux pluies.

3. Cadre humain et socio-économiques

3.1. Population de Tougou

Le bassin versant de Tougou abrite trois principaux villages à savoir : Tougou, Faogodo et Basnéré. Cette zone est essentiellement peuplée de Mossi et de Peuhls. Selon, les projections, la densité de la population de la commune de Namisiguima dans laquelle se trouve Tougou est estimée à 250 habitants/km² en 2018 (INSD, 2008). La plupart des terres dégradées au Burkina Faso ont une densité de population de 100 habitants/km² (Nyamekye et al., 2018). Ceci montre la forte pression des populations de Tougou sur l'environnement. La **Figure 2-4** montre l'évolution de la population de Tougou de 1952 à 2018. Le bassin a connu une augmentation de la population qui est environ de 3%, passant de 2090 habitants en 1952 à 4 322 en 1975 (Marchal, 1983). Le recensement général de la population en 2006 totalise 6552 habitants dans le bassin versant de Tougou (INSD, 2008). En 2018, on a estimé la population de Tougou à 9342 habitants (INSD, 2008). On a observé une diminution de la population entre 1970 et 1975 à cause de la forte migration des populations vers le sud pendant les épisodes de sécheresse des années 1970 (Marchal, 1983).

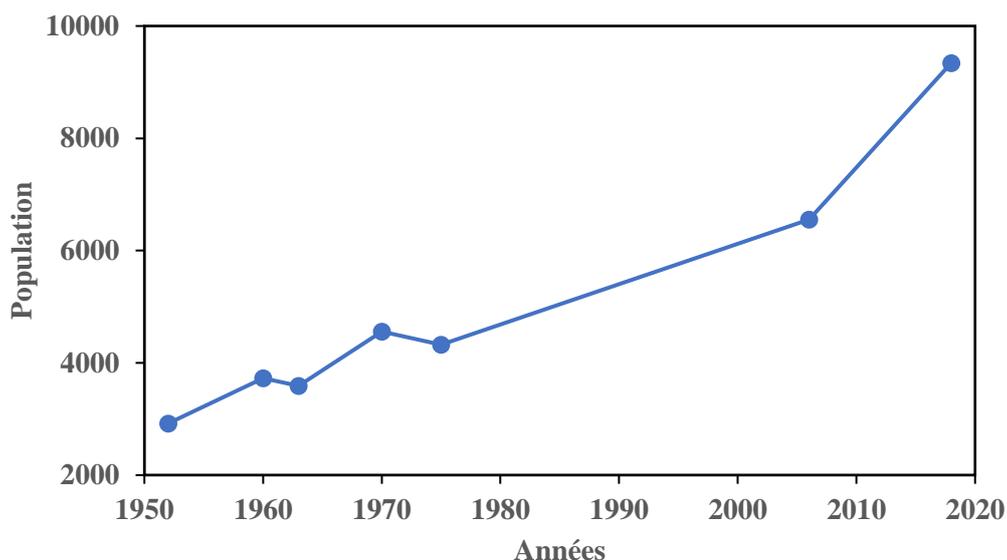


Figure 2-4 : Évolution de la population à Tougo de 1952 à 2004. (Sources : Marchal, 1983; INSD, 2008)

3.2. Activités économiques

La principale activité des habitants de Tougo est l'agriculture. Le mil et le sorgho sont les principales cultures de la zone. Elles constituent l'alimentation de base de la population. Les autres cultures céréalières sont le riz, le haricot et le maïs. Cette activité agricole occupe une bonne partie de la population de Tougo pendant et après la saison pluvieuse à travers deux types d'agriculture : l'agriculture pluviale et le maraîchage. L'agriculture pluviale est caractérisée par l'utilisation de moyens simples d'exploitation (la charrue, la daba, la pelle, la pioche, etc.) et soumise à de conditions édaphiques et pluviométriques précaires. Quant au maraîchage, il est rendu possible à la faveur du barrage situé en aval de l'exutoire du bassin versant de Tougo. L'élevage constitue la deuxième activité des populations du bassin versant de Tougo à l'exception de la population Peuhl qui en fait sa principale activité. Cette activité concerne essentiellement les bovins, les ovins, les caprins et la volaille et est pratiquée de façon traditionnelle et extensive (Barbier et al., 2009; Bambara et al., 2012a).

4. Justification du choix de la zone d'étude

4.1. Tougou : Observatoire expérimental sur l'eau, le climat et l'environnement

Le bassin versant de Tougou a fait l'objet de plusieurs années de recherches et constitue une base de données solide sur l'eau, le climat, l'environnement, la socio-économie et la production agricole. Déjà dans les années 1950, Marchal (1983) étudiait la dynamique spatiotemporelle de la végétation du bassin de Tougou et concluait sur sa représentativité du contexte sahélien. Il a constaté une nette diminution de la végétation et une augmentation des surfaces cultivées et des sols nus entre 1952 et 1973. Il a lié cette dynamique à l'action combinée de l'homme et du climat. L'étude du bilan d'eau au Burkina Faso a concerné le bassin de Tougou et a permis une meilleure connaissance (quantitative et qualitative) des différentes composantes du bilan hydrologique à l'échelle du bassin (IWACO, 1990). Diello (2007), lui a confirmé les résultats de Marchal sur un domaine plus large qui est le bassin du NAKAMBE (45 189 km²) et a poursuivi l'étude sur la dynamique des états de surface. Koussoubé (2007) a effectué une caractérisation du couvert végétal et de la production agricole du bassin de Tougou. Des auteurs comme Barbier et al. (2009) ont étudié la vulnérabilité des agriculteurs face à la variabilité climatique et ont évalué leurs moyens d'adaptation.

Des travaux de thèse en hydrologie, en hydrogéologie, en hydrochimie et en agriculture ont été réalisés dans le bassin versant de Tougou sous la direction de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). En effet, avec l'appui des partenaires financiers de l'institut, des projets de recherches ont permis l'acquisition et l'installation de plusieurs équipements modernes à Tougou. Il s'est agi des Programmes AMMA (Analyses multidisciplinaires de la Mousson Africaine), CRDI (Centre de Recherche pour le Développement International) et 3^E (Eau, Environnement et Énergie). Ainsi, Mounirou (2012) a pu effectuer des mesures de ruissellement et d'érosion sur ces unités homogènes en termes d'occupation du sol permettant ainsi de caractériser l'aptitude au ruissellement et à l'érosion des différents états de surfaces identifiés sur le bassin que sont : les sols cultivés, dégradés et en végétation. Maïga-Yaleu (2014) a analysé l'impact de l'érosion hydrique sur les sols et la qualité des eaux de ruissellement du bassin versant. Cette recherche a évalué de façon quantitative et qualitative les pertes et le stockage des éléments minéraux et du carbone organique dans le sol.

D'autres études plus récentes réalisées dans le bassin ont concerné la perception, la vulnérabilité et les stratégies d'adaptations des paysans de Tougou par rapport aux changements climatiques (Zongo et al., 2015; Bambara et al., 2016; Zorom et al., 2018).

La forte dégradation du milieu paysager du bassin (environ 21%), son appartenance à la zone climatique Sahélienne (sujette aux effets des changements climatiques), son suivi dans le long terme (presque 7 décennies) faisant du bassin un observatoire relativement unique pour cette sous-région et sa représentativité du contexte et problématiques sahéliennes sont les raisons qui ont conduit au choix du bassin versant de Tougou dans le cadre de cette étude.

4.2. Vulnérabilité, perception paysanne des changements climatiques et stratégies d'adaptations des agriculteurs

D'après Maddison (2007), une communauté est vulnérable, si elle est susceptible de souffrir de la faim ou de la pauvreté lorsqu'elle est exposée à une perturbation externe telle que la sécheresse, l'inondation, l'invasion des ravageurs ou une épidémie. Les personnes vulnérables n'ont pas les moyens de constituer des stocks alimentaires ou d'acheter de la nourriture pendant les périodes de soudure. La précarité pluviométrique associée à la faible fertilité des sols sont les causes de la vulnérabilité des populations du Sahel à cause de la production agricole incertaine. Selon l'IPCC (2013), les rendements pourraient baisser de 50% d'ici à l'horizon 2020. L'étude réalisée par Barbier et al. (2009) dans le bassin de Tougou a montré une vulnérabilité des 2/3 des exploitants agricoles lorsque les criquets ont détruit les récoltes en 2004. Cependant 40% des exploitants étaient encore vulnérables en 2006 lorsque la saison a été pluvieuse et que les criquets avaient disparu. Les personnes vulnérables ont été incapables de couvrir leurs besoins en céréales. La pauvreté des sols, le choix des variétés à long cycle et les pratiques agricoles inadaptées ont été les causes de cette vulnérabilité observée en 2006. Il ressort aussi de l'étude qu'en cas de sécheresse les paysans de Tougou sont contraints de vendre leurs animaux, de réduire leurs rations alimentaires, de migrer vers d'autres régions de façon temporaires ou permanentes ou tout simplement de changer d'activité (orpaillage, commerce, etc.).

Des études menées dans la zone de Tougou (Barbier et al., 2009; Zongo et al., 2015; Bambara et al., 2016; Zorom et al., 2018) montrent que les producteurs perçoivent clairement les effets des changements climatiques sur la production agricole. Les paramètres climatiques tels que la

pluviométrie, la température et le vent ont été cités comme déterminants pour une bonne ou une mauvaise saison. La baisse de la pluviosité, l'arrêt précoce des pluies, le raccourcissement de la durée de la saison pluvieuse et l'augmentation de la durée des poches sèches en pleine saison sont perçus par plus 50% des personnes enquêtées. Ensuite, les températures de plus en plus fortes et la diminution de l'intensité du froid sont perçues respectivement par 80% et 55% des personnes enquêtées. Enfin les vents de plus en plus violents sont perçus par 60% des personnes enquêtées. Il existe une concordance entre les perceptions paysannes et l'analyse des variables climatiques dans le bassin de Tougou (Bambara et al., 2016). Le lien que font les producteurs des changements climatiques associés à la production agricole est assez impressionnant (Barbier et al., 2009). Ils associent les meilleurs rendements aux longues saisons des pluies sans poches sèches pendant la floraison. Les pires saisons correspondent à l'avènement d'une sécheresse pendant la période de remplissage de grains ou l'arrêt précoce de la saison des pluies durant la phase de maturation des cultures. Les producteurs ajoutent que les fortes intensités des vents, des pluies et les inondations pourraient endommager la croissance des plants.

Au regard de la production agricole incertaine et la vulnérabilité des populations, face aux changements environnementaux, des auteurs (Barbier et al., 2009; Zorom et al., 2018) ont indiqué une large adoption des techniques CES par les producteurs du bassin versant de Tougou. En effet, près de 70% des producteurs ont adopté les techniques CES. Ces techniques ont permis d'augmenter les rendements et le fourrage pour le bétail. Les paysans ont également adopté des variétés à cycle court.

5. Site expérimental

Cette recherche vise à déterminer l'effet hydrologique des techniques CES/DRS sur des sols typiquement dégradés, spécifiquement les sols à croûte d'érosion majoritairement rencontrés en zone sahélienne. Ainsi, le site retenu pour l'emplacement du dispositif expérimental est un sol dégradé appelé « zipéllé » (clairière en langue mossi) comme illustré à la **Figure 2-5**. Ce sol dégradé n'est pas exploité car il a perdu sa capacité de production. Les unités pédologiques sont des sols ferrugineux lessivés et sont parcourus entièrement par des croûtes d'érosion qui limitent l'infiltration et accroissent le ruissellement d'après le rapport du BUNASOL en **Annexe 1**. En effet, avant la mise en place du dispositif expérimental, le site a fait l'objet de mesures de conductivités hydrauliques à saturation. Les valeurs obtenues sont de $4.0 \pm (0.6)$

cm/h et sont proches de celles obtenues par Mounirou et al. (2012) dans le même bassin versant. Il est colonisé par une végétation naturelle composée de quelques rares espèces arbustives : *Balanites aegyptiaca* (datte du désert), *Acacia nilotica* et *Leptadenia hastata*. Localisé sur la rive gauche du cours d'eau, le site expérimental est facilement accessible et situé à environ 200 m d'une concession villageoise pour des besoins de sécurité des installations. Ses coordonnées géographiques sont : latitude 13.67°N et longitude 02.26°W.

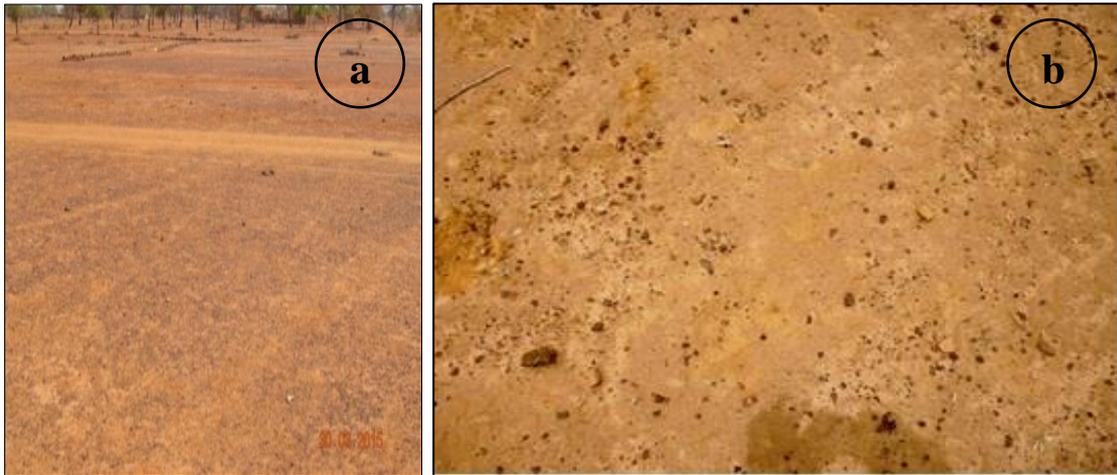


Figure 2-5 : Photographie illustrant le site expérimental (a) et la croûte d'érosion (b) avec épandage de graviers ferrugineux et ferro-manganiques. Photo : Zouré Cheick Oumar.

5.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été installé sur le site précédemment décrit. Le type de sol est ferrugineux tropical, lessivé avec des sédiments et des concrétions (BUNASOLS, 2015). L'emplacement du dispositif expérimental a fait l'objet d'un levé topographique (**Annexe 2**) dans le but de l'implanter suivant la plus grande pente du terrain naturel. La pente moyenne du terrain est de 1,33%. Le sol à une profondeur de 120 cm avec trois horizons distincts résumé dans le **Tableau 2-2**. Une lecture du profil pédologique a été faite à travers l'ouverture de deux fosses pédologiques (**Figure 2-6**).

Tableau 2-1 : Texture du sol sur lequel est installé le dispositif expérimental de Tougou. pF2.5 : Humidité à la capacité au champ, pF4.2 : Humidité au point de flétrissement (BUNASOLS, 2015).

Profondeur cm	Classe texturale (USDA)	Argile %	Limons %	Sable %	pF 2.5	pF 4.2	Densité apparente (g/cm ³)
0-22	Argileux	43	22	35	0.2	0.09	1.67
22-56	Limono-argileux	35	22	43	0.2	0.01	1.67
56-83	Limono-argilo- sableux	31	18	51	0.18	0.09	1.7
83-120	Limono-argilo- sableux	31	18	51	0.19	0.09	1.74



Figure 2-6: Ouverture de fosse pédologique avec illustration des différents profils

Le dispositif expérimental consiste en deux répétitions (A et B) d'un bloc aléatoire complet de Fisher (Jayaraman, 1999). Chaque bloc est composé de quatre parcelles de dimensions 20 m de long et 10 m de large chacune où différentes techniques CES ont été mises en place (**Figure 2-7**). Chaque parcelle est isolée par des feuilles de tôle ondulée, encastrées à la verticale de 30 cm de profondeur et surélevées de 30 cm au-dessus du sol afin d'empêcher le ruissellement latéral d'une parcelle à l'autre. La **Figure 2-8** montre une photo du dispositif expérimental avant le début de la saison pluvieuse 2016.

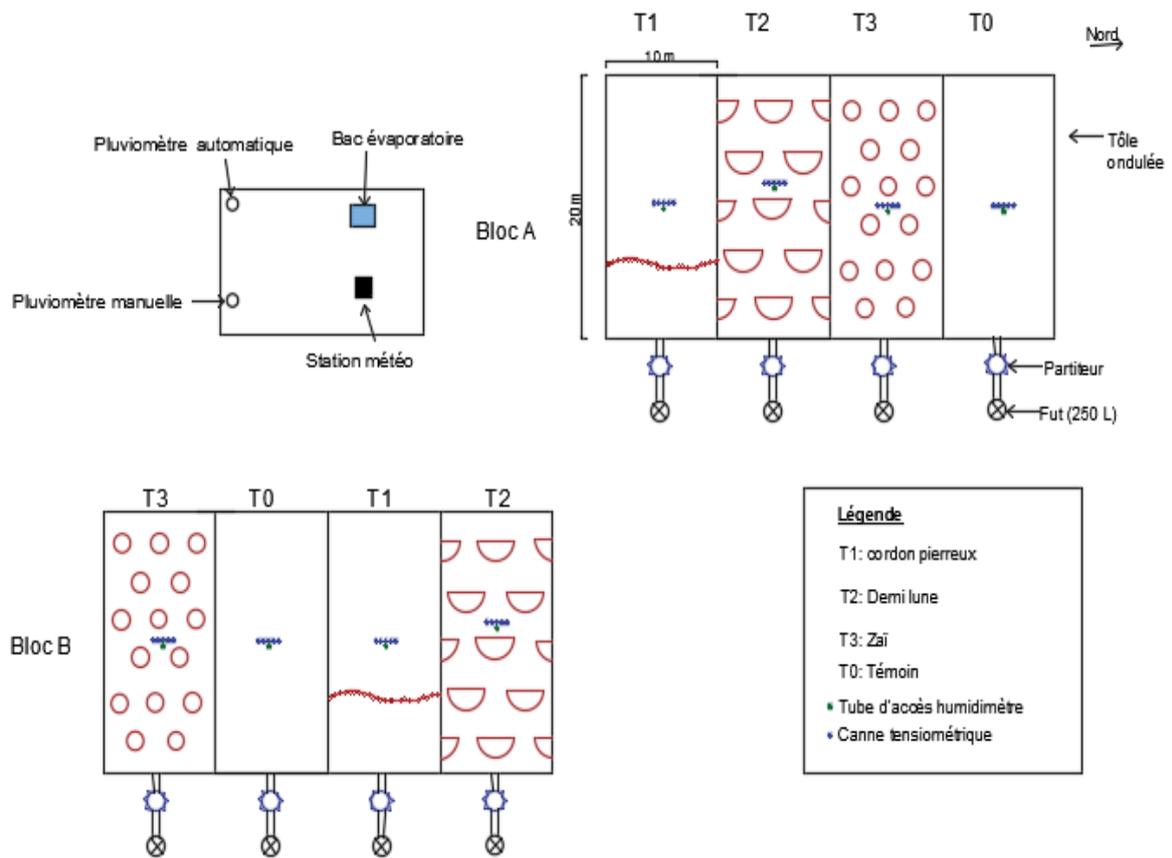


Figure 2-7: Dispositif expérimental de Tougou. Semis direct (T0), cordon pierreux (T1), demi-lune (T2) et zai (T3). Notez que les demi-lunes et le zai ne sont pas représentés à l'échelle



Figure 2-8: Photo d'ensemble du dispositif expérimental de Tougou. Photo : Zouré Cheick Oumar.

Les techniques CES couramment adoptées dans le bassin versant ont été mises en œuvre dans les différentes parcelles avant la saison des pluies 2015 (juillet à octobre) puis réhabilitées à la même période en 2016 et 2017. Ces techniques sont le cordon pierreux (T1), la demi-lune (T2), le zaï (T3) et le semis direct à la « daba » qui constitue la parcelle témoin (T0) (**Figure 2-8**). La parcelle de zaï est constituée de trous excavés distants de 80 cm et répartis en quinconce, avec un diamètre de 40 cm et une profondeur de 10 à 15 cm. Les demi-lunes sont des excavations semi-circulaires en quinconce, d'un diamètre de 4 m et d'une profondeur de 15 à 25 cm. Deux mètres séparent deux demi-lunes sur la même rangée, et la distance entre les rangées est de 4 m. Les matériaux excavés au plus profonds de la demi-lune sont utilisés pour former des bourrelets autour du demi-cercle du côté aval, tandis que les matériaux excavés moins profonds sont mélangés avec du fumier et replacés dans la demi-lune. La parcelle de cordon pierreux a consisté en une ligne de pierres encastrées à 15 cm dans le sol, perpendiculairement au sens d'écoulement de l'eau. Le cordon pierreux mesure 20 à 30 cm de hauteur et 15 à 20 cm de large. Dans la parcelle de 20 m de long, une seule rangée a été réalisée à 6 m de l'exutoire. La mise en place d'une seule ligne de cordon-pierreux est contrainte par la longueur de la parcelle, car selon les recommandations la distance entre cordon pierreux varie de 15 à 50 m pour les pentes de 0.5 à 3% (Vlaar, J., 1992; WOCAT, 2017b). Il n'a donc pas été possible d'installer plus d'une ligne de cordon-pierreux. Les pratiques agricoles sont illustrées à la **Figure 2-9**.



*Figure 2-9: Photos des pratiques agricoles en début de saison des pluies (juillet 2015)
Témoin (en haut, à gauche), cordon pierreux (en haut, à droite), zai (en bas, à gauche) et demi-lune (en bas, à droite).
Photo : Zouré Cheick Oumar.*

Le matériel végétal est une variété de mil (IKMP5, surnommé Kiipala). Cette culture a été introduite au Burkina Faso par l'INERA pour sa résistance aux épisodes de sécheresse, sa précocité et son cycle de développement relativement court. En effet, la floraison commence 70 jours après le semis, au lieu de 80 jours pour le mil conventionnel, résultant en une large adoption par les producteurs. Les semis ont été effectués après le début de la saison des pluies à intervalles réguliers de 60 cm sur chaque parcelle sauf sur la parcelle de zai, où l'espacement est de 80 cm et réparti en quinconce. La même quantité de fumier et d'engrais minéral a été utilisée pour l'amendement de chaque parcelle. Le fumier appliqué avant le semis est la bouse de vache (15 t/ha). L'engrais NPK (14-23-14, 100 kg/ha) est appliqué après le premier sarclage soit 14 jours après le semis. L'urée (dose de 40%, 50 kg/ha) est apportée en deux fractions ; 30 jours après semis pour la première application correspondant au deuxième sarclage et 56 jours après le semis pour la deuxième application correspondant au troisième sarclage (Africare and Inera, 2014c). L'amendement minéral se fait aux périodes indiquées après une bonne pluie.

5.2. Protocole expérimental

Un dispositif de mesure des paramètres hydrométéorologiques est installé à proximité des parcelles (**Figure 2-10**). Ce dispositif comprend (i) un pluviomètre automatique (RainLogger Gold, Solinst, Canada) et un pluviomètre manuel pour la mesure de la hauteur de pluie après chaque évènement pluvieux, (ii) une station météorologique de type WatchDog 2000 series (Spectrum Technologies Inc., USA) qui enregistre à pas de temps horaire plusieurs paramètres météorologique (température, rayonnement solaire, vitesse et la direction du vent à 2 m du sol, pluie à 2m du sol, point de rosée et humidité relative de l'air). Ces paramètres permettent de calculer l'évapotranspiration de référence à partir de la méthode Penman-Monteith (Allen et al., 1998) ; (iii) un bac d'évaporation type Colorado pour les mesures journalières de l'évaporation.



*Figure 2-10: Dispositif de mesure des précipitations et des paramètres météorologiques
Pluviomètre manuel (a), station météo WatchDog (b), pluviomètre automatique RainLogger Gold (c) et bac Colorado (d).
Photo : Zouré Cheick Oumar.*

L'exutoire de chaque parcelle est équipé pour les mesures manuelles de lames d'eau ruisselées après les évènements pluvieux. Il s'agit d'un bac métallique de diamètre 100 cm et de hauteur 30 cm avec 40 orifices (diamètre de 30 mm) percés autour de sa circonférence à la même hauteur de 20 cm du fond du partiteur. En plus, un tuyau en plastique raccorde l'un des orifices du bac à un fût étalonné (250 litres) et enterré à partir duquel le volume de ruissellement est mesuré. La mesure de la hauteur d'eau dans le fût se fait à l'aide d'une règle graduée. La **Figure 2-11** montre le dispositif de mesure de ruissellement sur la parcelle de demi-lune du bloc A (T2A). La **Figure 2-12** montre deux exemples de courbes de tarage obtenues sur la parcelle témoin du bloc A (T0A) et la parcelle de Zaï du bloc B (T3B).



Figure 2-11: Dispositif de mesure de la lame d'eau ruisselée: (a) partiteur, (b) fût de 250 litres. Photo : Zouré Cheick Oumar

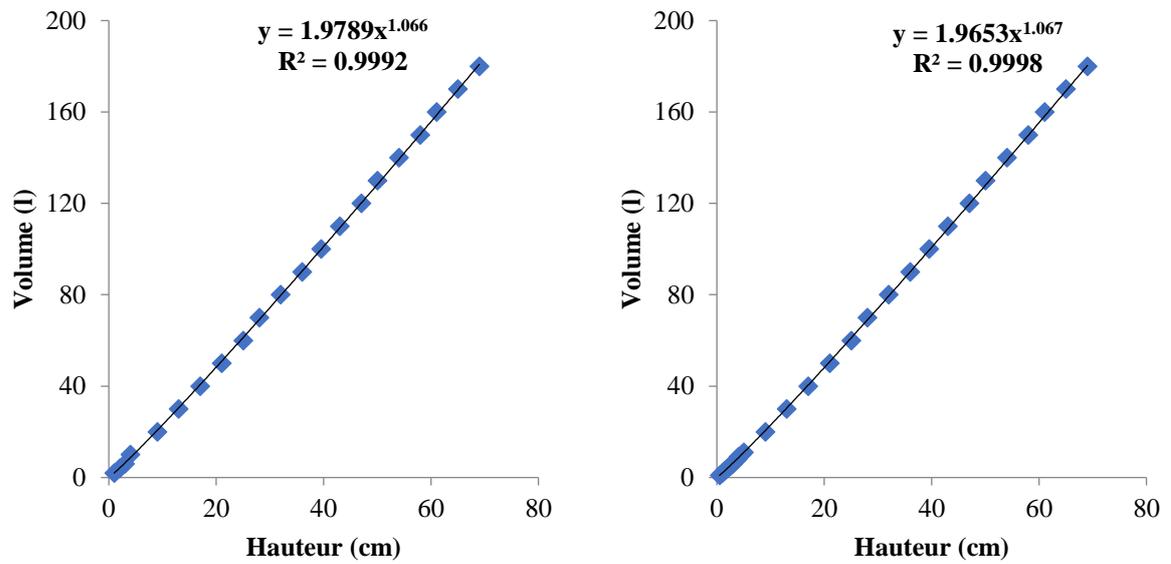
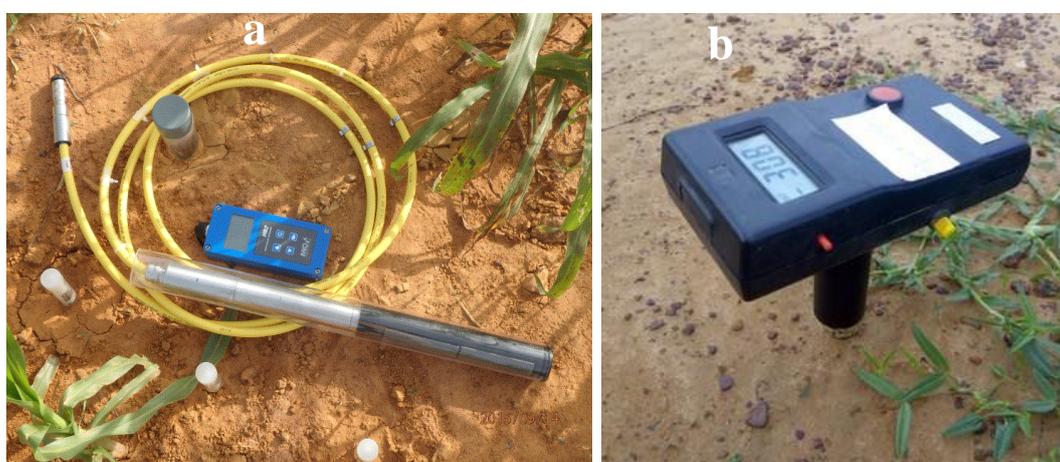


Figure 2-12: Exemple de courbe de tarage des fûts de 250 litres. A gauche la courbe obtenue sur la parcelle témoin du bloc A (T0A) et à droite la courbe obtenue sur la parcelle de Zaï du bloc B (T3B).

L'humidité volumétrique et la charge de pression du sol ont été mesurées à l'aide d'un capteur d'humidité TDR (TRIME-PICO T3 / IPH44, SDEC France) et d'un tensiomètre électronique (SMS 2500S, SDEC France) illustrées à la **Figure 2-13**. L'humidité a été enregistrée quotidiennement (avant 6h tous les matins) tous les 10 cm jusqu'à 100 cm du sol. Il est de même de la charge de pression dont les mesures sont effectuées tous les 20 cm jusqu'à 120 cm du sol. Un tube d'accès d'humidité et 5 cannes tensiométriques ont été installés au centre de chaque parcelle (c'est-à-dire entre les dépressions pour le cas des poquets de zaï et des étangs en demi-lune).



*Figure 2-13: Dispositif de mesure des variables d'états : TRIME-PICO T3 (a) et SMS 2500S (b).
Photo: Zouré Cheick Oumar*

Les conductivités hydrauliques saturée et non saturée du sol ont été évaluées respectivement à l'aide d'un infiltromètre à double anneau (SDEC France) et d'un infiltromètre à membrane déporté (SDEC France) présentés à la **Figure 2-14**. Les conductivités hydrauliques à saturation sont mesurées en trois répétitions à différents emplacements sur chaque parcelle (à l'intérieur des dépressions de zaï et demi-lune) avant le début des pluies en 2015, 2016 et 2017. Les essais d'infiltration ont été réalisés avec une lame d'eau constante de 3 cm maintenue à la surface du sol jusqu'à atteindre le taux d'infiltration constant. Les mesures de la conductivité non saturée ont été réalisées sur l'ensemble des huit parcelles. Sur chaque parcelle, les essais d'infiltrométrie ont été effectués aux succions proches de la saturation (20, 40 et 60 mm) avec une répétition de 3 mesures par succion et la valeur moyenne a été retenue. Avant le début et à la fin de chaque essai, des échantillons de sols sont prélevés pour l'obtention des teneurs en eau initiale et finale.

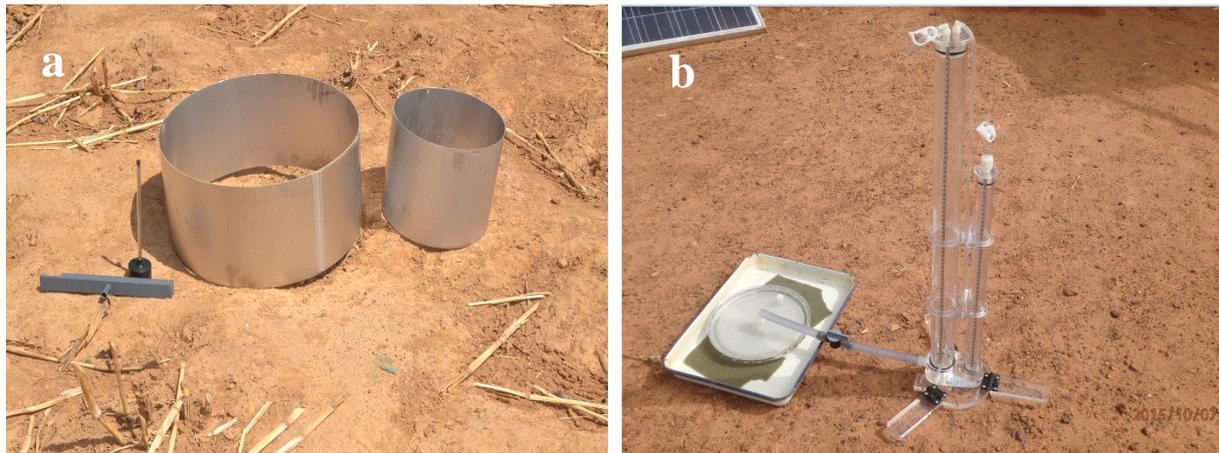


Figure 2-14: Dispositif de mesure des propriétés hydrauliques de surface : Double anneau (a) et infiltromètre à membrane déportée (b). Photo : Zouré Cheick Oumar

Le drainage a été estimé en utilisant l'Equation de Darcy (Darcy, 1856) à une profondeur de 100 cm, car la profondeur d'enracinement pour le mil ne devrait pas dépasser cette valeur (Allen et al., 1998). La mesure quotidienne de la hauteur de pression à 80 et 120 cm et la détermination de la fonction de conductivité hydraulique insaturée à la profondeur de 100 cm ont été utilisées pour l'estimation du drainage.

En 2016 et 2017, le site expérimental a été suivi pendant toute la saison des pluies, c'est-à-dire à compter de la date de semis (2 juillet 2016 et 3 juillet 2017) jusqu'à la date de récolte (16 octobre 2016 et 15 octobre 2017). En 2015, l'installation du dispositif expérimental étant toujours en cours à la saison des pluies, les semis n'ont été faits que le 15 juillet et les mesures hydrologiques ont commencé le 10 août. La récolte a eu lieu à la fin des pluies le 12 octobre 2015.

6. Conclusion partielle

À travers cette présentation de la zone d'étude, il ressort que le bassin versant de Tougou présente les caractéristiques d'un milieu de type semi-aride. La précipitation moyenne annuelle est très faible comparativement à l'évapotranspiration et son milieu paysager est fortement dégradé. La végétation qui couvrait alors un cinquième de la superficie du bassin versant a quasiment disparu au profit des sols cultivés et des sols dénudés. Une perte significative de fertilité, due à l'impact de l'augmentation du ruissellement et de l'érosion sur ces sols nus a conduit à l'abandon de plusieurs surfaces. Cette paupérisation des sols combinée à la péjoration

climatique des dernières décennies ont encouragé plus de 70% des producteurs locaux à adopter des techniques CES dans le but de récupérer les sols dégradés, d'augmenter les rendements agricoles et d'améliorer les revenus monétaires des ménages.

Le dispositif expérimental est mis en place sur un sol dégradé et en croûte d'érosion pour étudier les performances hydrologiques des techniques culturales. Il est constitué d'un bloc aléatoire complet à deux répétitions et chaque bloc est constitué d'une parcelle de semis direct, de cordon pierreux, de zaï et de demi-lune cultivée avec du mil. Les données collectées pour chaque parcelle sont les paramètres pluviométriques, météorologiques, de ruissellement, de conductivité hydraulique de surface, d'humidité et de charge de pression du sol.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier les performances hydrologiques des techniques CES par rapport à la technique de semis direct. Des analyses statistiques sur les données de ruissellement sont réalisées sur les parcelles de mêmes natures et les parcelles de natures différentes.

Chapitre 3 : Evaluation des performances hydrologiques des différentes techniques culturales

1. Introduction

En hydrologie, l'infiltration désigne le processus de pénétration de l'eau à travers la surface du sol. Ce processus d'infiltration est conditionné en majeure partie par les caractéristiques hydrodynamiques (capacité de rétention en eau et conductivité hydraulique), la texture et la structure du sol (Velluet, C., 2014). L'infiltration offre un intérêt particulier sur les plans hydrologique et agronomique puisqu'elle détermine pendant l'évènement pluviométrique l'intensité du ruissellement et la teneur en eau du sol. La performance hydrologique d'une technique agricole est la capacité de la technique à collecter, infiltrer et stocker l'eau dans le sol afin de satisfaire les besoins hydriques de la plante.

En zone sahélienne, les croûtes superficielles (micro-horizons épais de l'ordre du mm au cm) affectent fortement les propriétés hydrodynamiques du sol. Sur le plan hydrologique, les croûtes superficielles réduisent la capacité d'infiltration du sol et augmentent le ruissellement (Casenave, 1991). Dans le cas des sols cultivés, les pratiques agricoles modifient les propriétés hydrauliques et physiques de la surface du sol (Ahuja et al., 1998; Niang, 2006) affectant ainsi la productivité agricole. Des travaux montrent qu'en fonction des propriétés du sol et des caractéristiques de la pluie les pratiques agricoles pourraient permettre un encroûtement superficiel du sol (Allmaras et al., 1967; Descroix et al., 2011; Souley Yero, 2012). Cependant, d'autres études ont relevé une amélioration de l'infiltration par l'augmentation de la porosité et de la rugosité de la couche cultivée limitant ainsi, la formation des croûtes superficielles (Ambouta et al., 1996; Abdou et al., 2015; n'Guessan et al., 2015).

Plusieurs études se sont intéressées aux effets agronomiques des techniques CES. Ces techniques ont montré leur capacité à améliorer l'humidité du sol, à prolonger la période de disponibilité de l'eau du sol pour favoriser la production agricole (R Zougmore et al., 2003; Mugabe, 2004; Da, 2008). Il est par conséquent connu que l'infiltration améliore le stock d'eau du sol, cependant en terme de processus hydrodynamique, il existe peu d'études expliquant l'effet des techniques CES sur les propriétés de transfert de l'eau dans le sol et sur la quantification de ces différents paramètres hydrologiques.

Ce chapitre 3 vise à évaluer l'effet des techniques CES (cordon pierreux, zaï et demi-lune) sur les propriétés de transfert de l'eau dans le sol et à quantifier les paramètres hydrologiques des sols soumis à différentes techniques agricoles.

2. Matériels et méthodes

2.1. Détermination de la lame d'eau ruisselée sur la parcelle

Le volume d'eau ruisselé à l'échelle de la parcelle de 200 m² et pour chaque technique agricole à l'issue d'un évènement pluvieux est déterminé à partir du volume d'eau recueilli par le partiteur et éventuellement du volume d'eau transité dans le fût étalonné. La lame d'eau ruisselée sur la parcelle est calculée par le biais de **l'équation 1** :

$$Lr = \frac{V_p + 40 \times V_f}{S} \quad (1)$$

Avec Lr [L] la lame d'eau ruisselée, V_p [L³] le volume d'eau dans le partiteur, V_f [L³] le volume d'eau dans le fût, S [L²] la surface de la parcelle et 40 correspond au nombre d'orifices sur le partiteur.

2.2. Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un processus complexe composé d'une évaporation physique de l'eau du sol et d'une évaporation physiologique qui est la transpiration. D'une manière générale l'évapotranspiration est conditionnée par le climat, le sol et le type de culture (Charlier, 2007). Ce terme du bilan est difficile à déterminer. L'équation de Penman-Montheith (Allen et al., 1998) est la plus complète et la plus précise pour estimer l'évapotranspiration de référence (Martinez et Thepadia, 2010; Fatah et al., 2012), les résultats obtenus par cette méthode étant proches de ceux obtenus par les lysimètres (Walter et al., 2000). La méthode a également montré de bonnes performances par rapport aux autres méthodes physiques et empiriques telles que Hargreaves et Samani, Thornthwaite, Blaney-Griddle, Turc, et Valiantzas dans les conditions sahéliennes (Djaman et al., 2015). Les paramètres climatiques ayant été mesurés, nous avons utilisé le modèle de Penman-Montheith (Allen et al., 1998) illustré par **l'Equation 2** pour une meilleure approximation de l'évapotranspiration de référence (ET_0).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

Avec ET_0 : [mm.j⁻¹] l'évapotranspiration de référence ; Δ : [kPa. °C⁻¹] la pente de pression de saturation de vapeur ; R_n : [MJ.m⁻².j⁻¹] la radiation nette à la surface ; G : [MJ.m⁻².j⁻¹] la densité de flux de chaleur nette émanant du sol ; γ : [kPa.°C⁻¹] la constante psychrométrique ; T : [°C] la température moyenne de l'air ambiant à 2 m au-dessus du sol ; u_2 : [m.s⁻¹] la vitesse moyenne du vent à 2 m au-dessus du sol et $e_s - e_a$: [kPa] la déficite de pression de vapeur saturante.

2.3. Evaluation des propriétés hydrodynamiques du sol

La détermination des propriétés hydrauliques de surface a concerné la conductivité hydraulique saturée, la conductivité hydraulique non saturée, la sorptivité et la taille moyenne des pores actifs des sols soumis aux différentes techniques CES.

2.3.1. La conductivité hydraulique à saturation du sol

La conductivité hydraulique saturée du sol en rapport avec les pratiques agricoles a été évaluée à l'aide d'un ensemble de trois infiltromètres à double anneau (SDEC France). Le dispositif de mesure est constitué de deux anneaux concentriques dont les diamètres intérieurs pour les différents anneaux centraux sont respectivement de 28 cm, 30 cm et 32 cm. Les anneaux concentriques enfoncés à environ 2 cm dans le sol ont pour rôle de forcer l'écoulement en monodimensionnel vertical. Le fait d'avoir un écoulement vertical réduit fortement les incertitudes sur la détermination de la conductivité hydraulique, ce qui permet de faire des comparaisons entre techniques agricoles et d'éviter les erreurs liées aux bruits des mesures (Vandervaere et al., 2000). Les mesures de conductivités hydrauliques saturées ont été réalisées en trois (3) emplacements différents (amont, milieu et aval) sur chaque parcelle (pour les cas particuliers des parcelles de zaï et demi-lune les mesures ont été faites à l'intérieur des dépressions) avant le début des pluies pour chaque année 2015, 2016 et 2017. L'essai d'infiltration a été réalisé pendant une durée de 4h de temps avec une lame d'eau constante de 3 cm maintenue à la surface du sol jusqu'à atteindre le taux d'infiltration constant. Pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation, la loi de Darcy (**Equation 3**) appliquée en milieu poreux et restreinte à la dimension verticale a été utilisée (Peugeot, 1995).

$$q = -K(\theta) \times \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \quad (3)$$

Avec : q [$L.T^{-1}$] la densité du volume d'eau (débit par unité de surface), $K(\theta)$ [$L.T^{-1}$], la conductivité hydraulique du milieu et $\frac{\partial(h)}{\partial(z)}$ est le gradient de charge hydraulique.

Au début du processus d'infiltration sur un sol initialement sec, la pression capillaire est élevée et la charge de pression atteint des valeurs importantes, supérieures de plusieurs ordre de grandeur à $K(\theta)$. Par conséquent, le flux d'infiltration est très important au début de l'infiltration. Au fil du temps la valeur du gradient va décroître pour s'approcher de l'unité (**Figure 3-1**). L'intensité de l'infiltration diminue et tend asymptotiquement vers la valeur de la conductivité hydraulique à saturation du sol (Peugeot, 1995; Niang, 2006; Keita et al., 2014; Abdou et al., 2015). La conductivité hydraulique à saturation est obtenue en traçant l'asymptote à la courbe d'évolution temporelle de la capacité d'infiltration (Niang et al., 2012; Keita et al., 2014). Pour chaque essai, la valeur de la conductivité hydraulique s'obtient en utilisant **l'équation 3**.

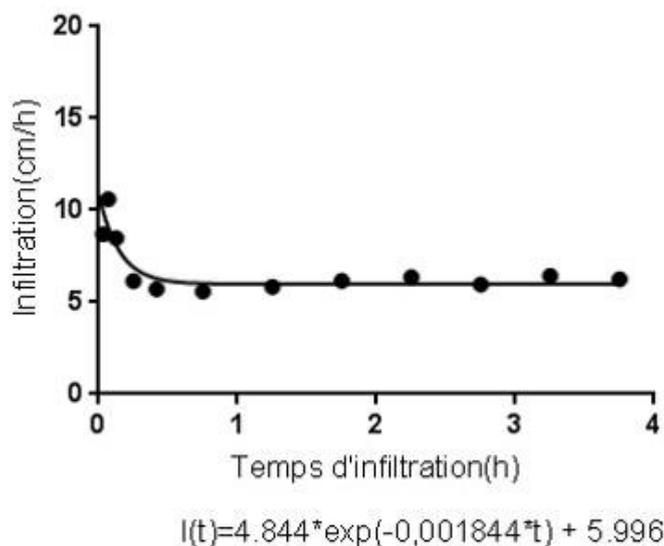


Figure 3-1: Exemple de stabilisation du flux d'infiltration au cours d'un essai sur la parcelle témoin

2.3.2. La conductivité hydraulique non saturée, la sorptivité et la taille moyenne des pores actifs des sols

La méthode fondée sur l'utilisation de l'infiltromètre à disque a permis de déterminer de façon in situ la conductivité hydraulique non saturée, la sorptivité capillaire proches de la saturation et la taille moyenne des pores actifs des sols aménagés. L'infiltromètre à disque est largement utilisé pour caractériser la macroporosité et les propriétés hydrauliques des sols encroûtés et cultivés au Sahel (Vandervaere et al., 2000; Ndiaye et al., 2005; Niang, 2006; Serme, 2015).

Dans le cadre de notre étude, les mesures ont été effectuées sur l'ensemble des huit (8) parcelles du site expérimental. Les mesures ont été réalisées en amont, au milieu et en aval de chaque parcelle (pour les cas particuliers des parcelles de zaï et demi-lune les mesures ont été faites à l'intérieur des dépressions) avant le début des pluies en 2016. Sur chaque parcelle, les essais d'infiltrométrie ont été réalisés aux succions proches de la saturation (20, 40 et 60 mm) avec une répétition de 3 mesures par succion. Avant le début et à la fin de chaque essai, des échantillons de sols sont prélevés pour l'obtention des teneurs en eau initiale et finale. Pour la détermination des différents paramètres sus-cités, nous avons utilisé la méthode d'infiltration en régime transitoire axisymétrique basée sur la solution de Phillip (1957). L'infiltration en régime transitoire axisymétrique à partir de l'infiltromètre à disque est décrite par l'équation 4 suivante :

$$I(t) = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad (4)$$

Avec I [L], l'infiltration cumulative, C_1 [$L.T^{-1/2}$] la sorptivité capillaire, t [T] le temps et C_2 une constante empirique du sol liée à la conductivité hydraulique non saturée.

D'après Haverkamp et al. (1994), les coefficients C_1 et C_2 peuvent être représentés respectivement par les équations 5 et 6.

$$C_1 = S \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\gamma S^2}{r(\theta_0 - \theta_i)} + \frac{2-\beta}{3} K \quad (6)$$

Où K [$L.T^{-1}$] est la conductivité hydraulique, r [L] est le rayon du disque, θ_0 et θ_i [L^3/L^3] sont respectivement la teneur en eau initiale et finale, γ est une constante prise égale à 0,7. β est un paramètre compris entre 0 et 1, dépendant du type de sol et de la charge de pression h_0 . Vandervaere et al. (2000) proposent d'utiliser la valeur $\beta = 0,6$. L'avantage de cette méthode

est qu'elle ne requiert pas d'estimation du flux en régime permanent et prend donc moins de temps.

Pour déterminer la sorptivité capillaire et la constante C_2 , une loi de régression linéaire est établie à partir de la dérivée de l'infiltration par rapport à la racine carrée du temps. La loi de régression est représentée par l'équation 7 :

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = S + 2C_2\sqrt{t} \quad (7)$$

La sorptivité capillaire et la conductivité hydraulique sont déduites de la représentation de cette droite de régression respectivement à partir de la valeur à l'origine du temps et de sa pente. Si on néglige les effets latéraux dans l'équation 6, la conductivité hydraulique peut être estimée à partir de l'équation 8 :

$$K = \frac{3}{2-\beta} C_2 \quad (8)$$

La connaissance de la sorptivité capillaire S et de la conductivité hydraulique K a été utilisée par certains auteurs (White et Sully, 1987) pour définir la longueur capillaire λ_c qui est une échelle macroscopique exprimant l'importance relative des forces capillaires et gravitaires agissant sur la pénétration de l'eau dans le sol. La formulation mathématique de la longueur capillaire est décrite par l'équation 9 :

$$\lambda_c = \frac{bS^2}{(\theta_0 - \theta_i)K} \quad (9)$$

Le paramètre b est généralement pris égal à 0.55 pour la plupart des sols (Warrick et Broadbridge, 1992; White et Sully, 1987).

En utilisant les lois élémentaires de la capillarité, (Philip, 1985) a introduit la dimension moyenne des pores hydrauliquement fonctionnels, λ_m , donnée par l'équation 10 :

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_w g \lambda_c} \quad (10)$$

où σ [L.T⁻²] est le coefficient de tension superficielle de l'eau (0.072 N/m à 25°C), ρ_w [M.L⁻³] la masse volumique de l'eau (1000 Kg/m³) et g [L.T⁻²] l'accélération de la pesanteur (9.81 m²/s).

En introduisant dans l'équation 10, les valeurs numériques de σ , ρ_w et g on obtient, en exprimant λ_m en μm l'équation 11.

$$\lambda_m = 13.3 \frac{(\theta_0 - \theta_i)K}{S_0^2} \quad (11)$$

2.4. Détermination de l'humidité et de la charge de pression du sol

Les mesures TDR et SMS 2500S ont été utilisées pour établir des profils d'humidité du sol ainsi que la variation temporelle de l'humidité et de la charge de pression à différentes profondeurs pour les différentes techniques CES.

La teneur en eau volumique est mesurée à l'aide d'un capteur d'humidité TDR (TRIME-PICO T3 / IPH44, SDEC France). Un tube d'accès d'humidité est installé au milieu de chaque parcelle à la profondeur de 1 m. Le tube est distant de 2 m en amont du cordon pierreux, et placé entre les poquets de zaï et les cuvettes de demi-lunes. Les mesures sont réalisées quotidiennement tous les 10 cm jusqu'à 100 cm de profondeur. Cette profondeur de mesure correspond à la zone racinaire du millet (Allen et al., 1998). La profondeur d'investigation de la sonde peut aller jusqu'à 15 cm dans le sol. La sensibilité de l'appareil est plus grande au voisinage des tubes et décroît dans le milieu.

La charge de pression est approchée à l'aide d'un tensiomètre électronique (SMS 2500S, SDEC France). Cinq (5) cannes tensiométriques sont installées sur chaque parcelle au voisinage des tubes d'accès d'humidité aux profondeurs 20, 40, 60, 80 et 120 cm. Les mesures journalières sont effectuées tous les matins à partir de 06h00. La canne tensiométrique est constituée à l'extrémité inférieure d'une céramique poreuse et à l'extrémité supérieure d'un bouchon auto-cicatrisant. Elle est remplie d'eau pour permettre l'équilibre physico-chimique entre le tube et le sol. Le déficit en eau du sol entraîne une diminution du niveau d'eau dans le tube créant ainsi une tension qui peut être approchée par le tensiomètre électronique. Lorsque le sol est sec, le tube peut se vider d'eau et rendre impossible les mesures.

2.5. Estimation de la lame d'eau drainée à 1 m de profondeur

Le transfert de l'eau dans un milieu poreux est décrit par la loi de Darcy (**Equation 12**), qui relie les caractéristiques hydrodynamiques du milieu au flux qui le traverse.

$$q = -K(h) \frac{dH}{dz} \quad (12)$$

avec q le flux hydrique, $K(h)$ la fonction de conductivité hydraulique et dH/dz le gradient de charge hydraulique. La charge est définie par $H = h - z$, l'axe des profondeurs étant orienté positivement vers le bas et l'origine prise à la surface du sol. La fonction $K(h)$ a été déterminée

à partir de la fonction de pédotransfert de Rosetta (Schaap et al., 2001) incorporée au code HYDRUS. Cette dernière a été utilisée pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) et l'inverse de la pression d'entrée d'air (α) grâce aux résultats de l'analyse granulométrique et la densité apparente du sol prélevé à 1m de profondeur. Des mesures tensiométriques, ont été réalisées aux profondeurs $z = 80$ cm et $z = 120$ cm permettant ainsi de fixer la profondeur de référence à 1m pour tenir compte de la profondeur d'enracinement du mil (Allen et al., 1998).

Le flux (**Equation 12**) ainsi estimé est une valeur instantanée correspondant au moment des mesures de la charge de pression h . Les mesures étant espacées dans le temps, la lame drainée ou hauteur percolée D est estimée à travers l'**équation 13** :

$$D = q \times \Delta t \quad (13)$$

où q est le flux hydrique moyen sur l'intervalle de temps Δt compris entre deux mesures successives de h . Cette estimation du drainage D n'est précise que lorsque la variation du flux q est faible sur la période considérée. Le choix de l'intervalle de mesures est donc un élément important pour la détermination du drainage avec peu d'incertitude.

2.6. Analyse statistique des données

Dans cette étude, l'homogénéité entre les parcelles de même nature (installées sur les différents blocs) est évaluée à l'aide du test de corrélation de Pearson sur les valeurs de ruissellement. Cette statistique est le coefficient de corrélation le plus communément utilisé car bien adapté aux données quantitatives continues. Sa valeur est comprise entre -1 et 1, et il mesure le niveau de relation linéaire entre deux variables. Ce test est implémenté à partir du logiciel XLSTAT 2016. Les P-values calculées pour les coefficients de corrélation permettent de tester l'hypothèse nulle de corrélation non significativement différente de zéro entre les deux variables (H_0 : inexistence de corrélation entre deux variables). Le test de Fisher est utilisé pour estimer l'égalité des variances. Les tests de normalité de Shapiro-Wilk et Anderson-Darling sont utilisés pour vérifier la normalité (Ghasemi et Zahediasl, 2012). Le seuil de confiance de 5% est utilisé pour déterminer le niveau de signification statistique.

Le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour déterminer si le ruissellement est significativement différent entre les quatre techniques agricoles. Il permet de tester si k échantillons proviennent de la même population, ou de populations ayant des caractéristiques identiques, au sens d'un paramètre de position (le paramètre de position est conceptuellement proche de la médiane). Si

on désigne par M_i le paramètre de position de l'échantillon i , les hypothèses nulle H_0 et alternative H_a du test de Kruskal-Wallis sont les suivantes :

- $H_0 : M_1 = M_2 = M_k$
- $H_a : \text{il existe au moins un couple } (i,j) \text{ tel que } M_i \neq M_j$

3. Résultats et discussion

3.1. Effet des pratiques agricoles sur le ruissellement

3.1.1. Caractéristiques des précipitations sur les parcelles expérimentales

Au cours de la période d'expérimentation (2015-2017), la pluviométrie a été mesurée pour étudier l'aptitude des techniques agricoles à réduire le ruissellement. Les hauteurs de pluie annuelles enregistrées sur la période de croissance des plantes en 2015, 2016 et 2017 sont respectivement de 648 mm (29 évènements), 424 mm (33 évènements) et 397 mm (34 évènements). La **Figure 3-2** montre que l'année 2015 a été mieux arrosée avec une meilleure répartition des pluies comparativement aux années 2016 et 2017. Les séquences sèches les plus longues observées en 2015 ont des durées inférieures à une semaine. Par contre, trois séquences sèches successives de 12 à 14 jours sans événement pluvieux significatif (le seuil de pluie considéré est de 2 mm pour tenir compte de l'évaporation minimale journalière) ont été observées en septembre et octobre 2016. En 2017, deux séquences sèches de 11 et 23 jours ont été enregistrées en juillet et octobre. En 2015, quatre évènements importants ont été observés (50, 54, 68 et 124 mm), alors qu'un seul évènement exceptionnel de 59 mm a été enregistré en 2017. En 2016, tous les évènements étaient inférieurs à 50 mm.

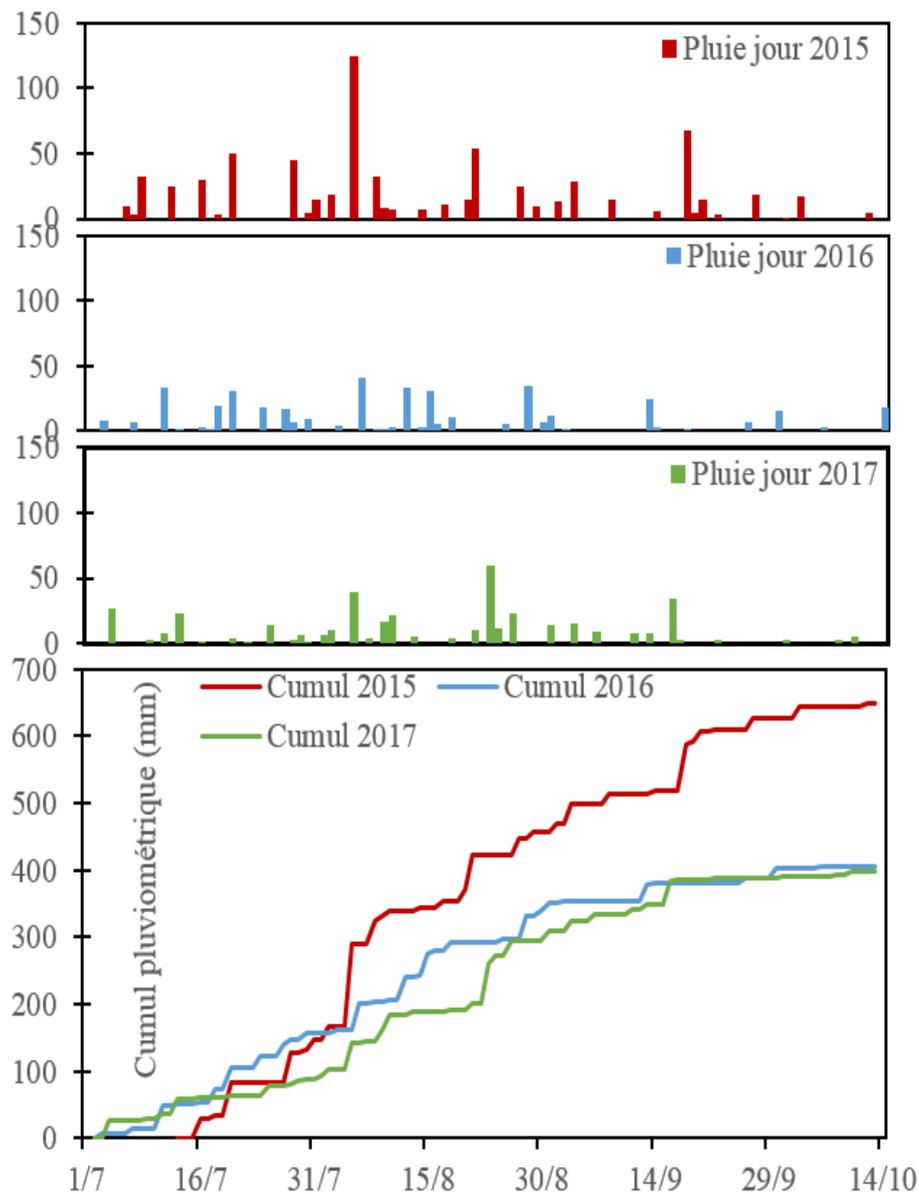


Figure 3-2: Cumuls et histogramme des pluies journalières après les dates de semis 2015, 2016 et 2017

Les précipitations et les volumes d'eau ruisselés pour chaque évènement pluvieux ont été mesurés pendant trois saisons consécutives en 2015, 2016 et 2017. En 2015, les mesures de ruissellements ont été disponibles uniquement les mois d'août et septembre. L'installation du dispositif expérimental a commencé en début de saison pluvieuse 2015 et s'est finalisé en moitié de saison (août 2015) ce qui n'a pas permis les mesures de ruissellements sur toute la saison. Les statistiques saisonnières des précipitations et des ruissellements sont résumés dans le **Tableau 3-1**.

Tableau 3-1 : Caractéristiques des précipitations et cumul des ruissellements pendant les saisons agricoles 2015-2017. Les valeurs indiquées pour le ruissellement sont les moyennes cumulatives pour les parcelles de même nature installées sur les blocs A et B, ainsi que leur écarts-types entre parenthèses.

Techniques agricoles		2015	2016	2017
Nombres d'épisodes pluvieux		29	33	34
Nombres d'épisodes pluvieux > 50 mm		4	-	1
Cumul de précipitation (mm)		648	424	397
Plus longue séquence sèche (jours)		6	14	23
Cumul de ruissellement (mm)	Témoin	108.7 ± (11.4)	131.9 ± (6.7)	123.7 ± (9.3)
	Cordon-pierreux	103.8 ± (12.1)	81.5 ± (5.9)	94 ± (8.1)
	Zaï	78.3 ± (12.2)	58.1 ± (5.5)	61.6 ± (8.4)
	Demi-lune	16.3 ± (3)	4.9 ± (0.2)	5.9 ± (0.6)
Réduction relative du ruissellement par rapport à la parcelle témoin	Témoin	-	-	-
	Cordon-pierreux	-4.5%	-38.2%	-24.0%
	Zaï	-27.9%	-56.0%	-50.2%
	Demi-lune	-85.0%	-96.3%	-95.3%

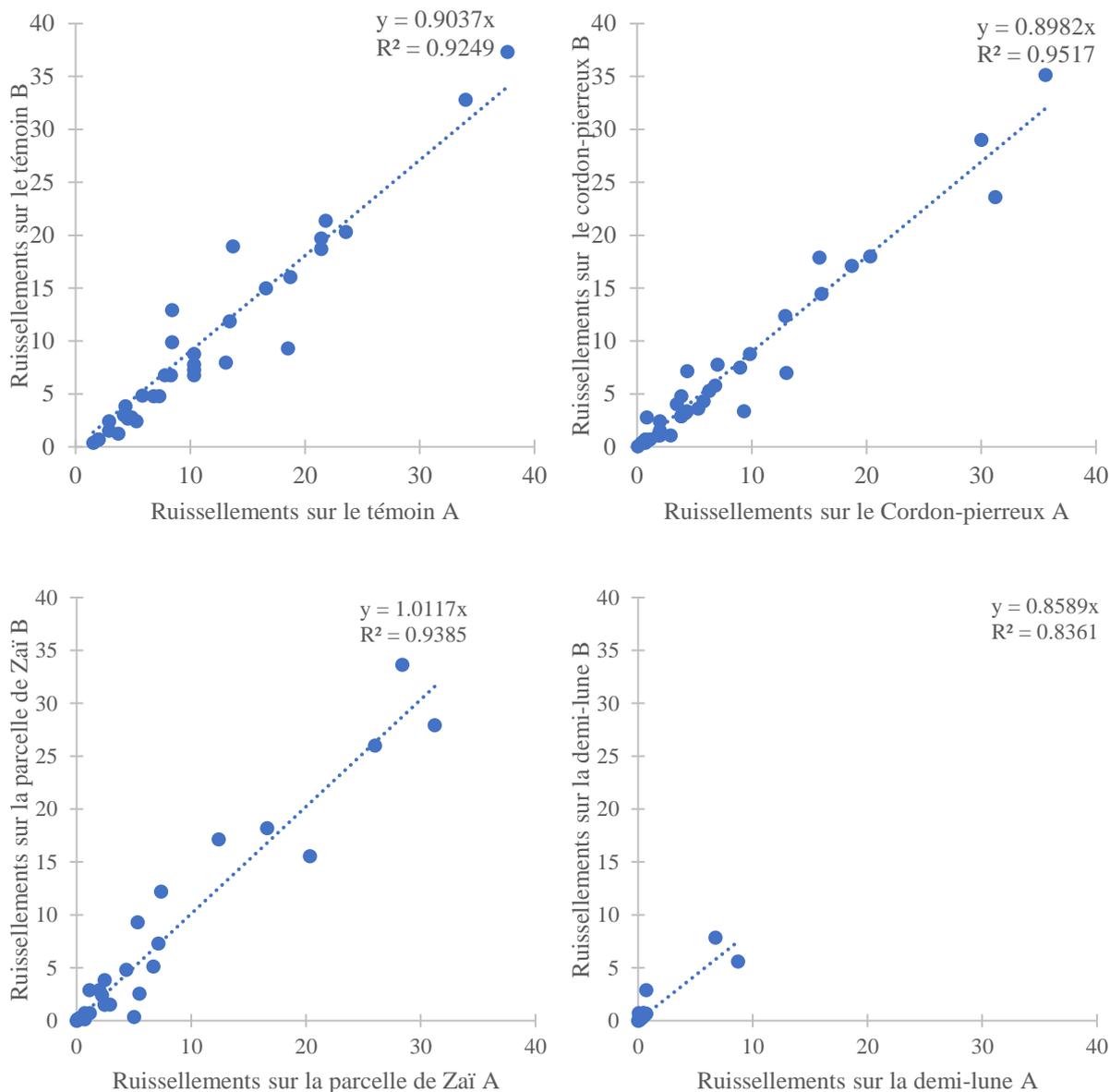
Comparativement à la parcelle témoin, les cumuls du ruissellement de 2016 et 2017 ont été réduits de 24-39% sur la parcelle de cordon pierreux, de 50-56% sur la parcelle de zaï et de 95-97% sur la parcelle de demi-lune (Il y'a très peu de ruissellement sur les demi lunes). On peut remarquer qu'en 2015, les facteurs de réduction de ruissellement de toutes les techniques ont été faibles par rapport aux années 2016 et 2017. Ceci pourrait s'expliquer par l'occurrence des évènements pluvieux plus importante observée en 2015. En effet, sur 9 évènements pluvieux ayant générés des ruissellements mesurés en 2015, 4 évènements ont indiqué des hauteurs de pluie d'au moins 25 mm (54, 25, 29, et 68 mm), induisant des ruissellements particulièrement importants sur les techniques de cordons pierreux et de Zaï. D'ailleurs, ces pratiques agricoles ne sont pas capables de collecter de grandes quantités d'eau du fait de leurs caractéristiques techniques. Aussi, plusieurs études ont montré une amélioration des performances de ces techniques au cours du temps après des années d'installation, ce qui pourrait expliquer l'importante réduction du ruissellement observée en 2016 et 2017 (Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2014).

3.1.2. Etude du ruissellement sur les différentes techniques agricoles

On dénombre 9, 16 et 11 mesures de ruissellements respectivement en 2015, 2016 et 2017 pour des évènements pluvieux indépendants. Le test de corrélation de Pearson sur ces échantillons de données de ruissellement, n'a montré aucune différence significative entre les parcelles du bloc A et B pour les mêmes techniques agricoles. Les coefficients de détermination (R^2) sont

supérieurs à 0.9 excepté celui pour les demi-lunes qui est de l'ordre de 0.83 (**Figure 3-3**). En réalité, on a noté un nombre de mesures de ruissellement beaucoup plus faibles observés sur ces parcelles de demi-lunes car seuls les évènements pluvieux de hauteurs de pluie supérieures à 50 mm ont généré le ruissellement significatif sur ces parcelles (**Figure 3-4**). Tous les coefficients de détermination sont significatifs à un niveau de signification de 0,05 (toutes les P-values étant inférieures à 0.0001). En d'autres termes, le risque de rejeter l'hypothèse nulle (les coefficients de corrélation sont égaux à 0) alors qu'il est vrai est inférieur à 5%. Ces résultats montrent que les blocs A et B sont similaires en terme de production de ruissellement. Le test de Kruskal-Wallis à un seuil de significativité de 5 % (en utilisant la comparaison par paire de Dunn) a montré une différence significative entre les parcelles de demi-lune, de zaï comparativement au témoin ($p\text{-value} < 0.0001$). Il n'existe pas de différence significative entre le témoin et les cordons-pierreux ($p\text{-value} = 0.72$).

Nous convenons que la mise en place d'un seul cordon pierreux dans la parcelle expérimentale n'est pas suffisante pour réduire le ruissellement de façon significative comparativement à la parcelle témoin. Étant donné que les trois pratiques (cordon-pierreux, zaï et demi-lune) sont largement adoptées par les paysans, nous avons souhaité étudier les performances hydrologiques de ces trois techniques en plus du témoin, mais en raison des contraintes pratiques d'espace, l'expérimentation s'est limitée à une seule rangée de pierre du fait des recommandations de distances entre cordons pierreux variant de 15 à 50 m. Cependant, la faible performance des cordons pierreux à réduire le ruissellement pourrait être imputé à son rôle de ralentisseur de ruissellement contrairement aux techniques de zaï et demi-lune qui ont le rôle de collecteur des eaux de ruissellement (Zougmoré et Zida, 2000; Africare et Inera, 2014a, 2014b).



*Figure 3-3 : Corrélation entre les ruissellements observés sur les parcelles de traitements identiques
Les 36 données de ruissellement mesurées durant les saisons 2015 à 2017 ont été utilisées pour déterminer les corrélations entre les parcelles de même nature.*

La **Figure 3-4** montre la dispersion des volumes ruisselés observés sur chaque pratique agricole au cours des trois (3) années de suivi (2015, 2016 et 2017). Le volume de ruissellement varie de 0 à 24 mm sur le témoin, 0 à 20 mm sur le cordon pierreux, 0 à 15 mm sur le zaï et 0 à 2 mm sur la demi-lune. Les volumes ruisselés médians sur les parcelles témoin, du cordon pierreux et de zaï sont respectivement 8.4, 4.3 et 2.1 mm. Sur les parcelles de demi-lunes les volumes ruisselés sont faibles (volumes ruisselés inférieurs à 10 mm pour les hauteurs de pluie supérieures à 50 mm). Ces résultats montrent la part importante de ruissellement générée par la

parcelle témoin et la performance des techniques CES à limiter les pertes d'eau par ruissellement.

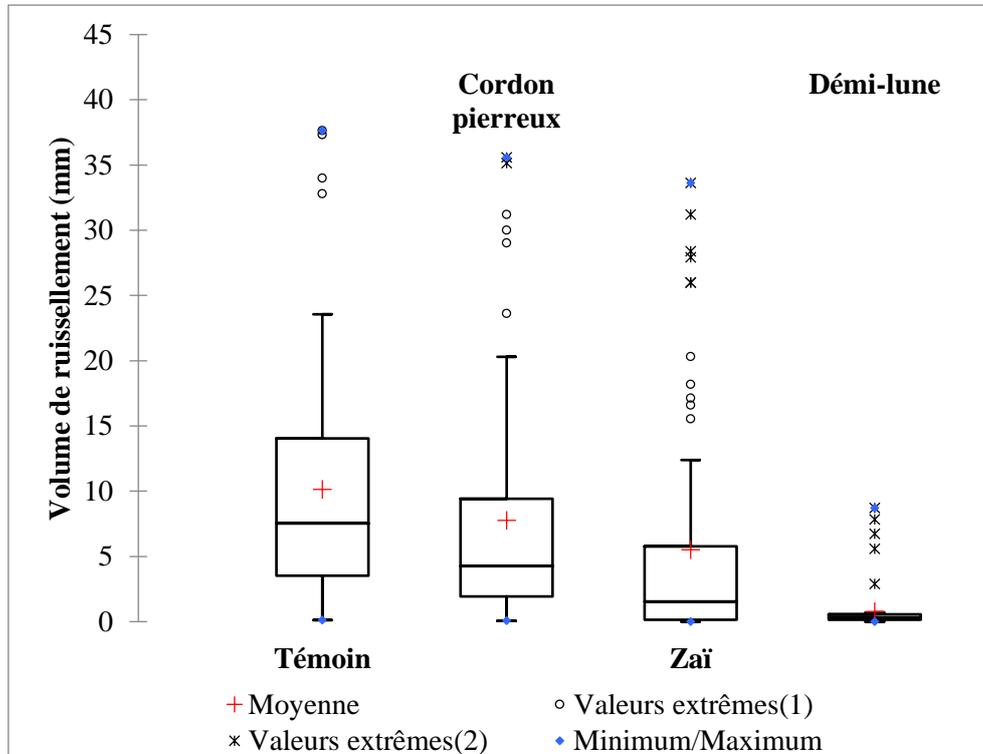


Figure 3-4: Boîte à moustache des événements de ruissellement de 2015, 2016 et 2017 combinés (36 événements).

Les bords supérieur et inférieur de la boîte représentent les 25% - et 75% -quartile. La ligne du milieu est la médiane. Les moustaches s'étendent jusqu'à la plus grande valeur de la série (respectivement plus petite) comprise entre Q3 (respectivement Q1) plus (ou moins) 1.5 fois la distance interquartile. Les points représentent toutes les données hors de la plage définie par les moustaches.

L'efficacité de la technique CES à réduire le ruissellement est essentiellement due aux caractéristiques techniques qui lui confère une capacité de collecte et de conservation des eaux de ruissellement. Dans le cas du cordon pierreux, il s'agit d'une barrière qui ralentie le ruissellement et favorise la rétention. Les poquets de Zaï et les cuvettes de demi-lunes installés suivant le sens d'écoulement de l'eau collectent et retiennent les eaux de pluie. Ces dépressions doivent se remplir entièrement avant la génération du ruissellement. Plus la dépression est grande, plus la collecte des eaux de pluie est importante. La disposition en quinconce des poquets et des cuvettes de demi-lunes permet également un maximum de collecte des eaux, car les eaux ruisselantes sont piégées entre les lignes d'écoulement. Ainsi, la parcelle ruisselle lorsque toutes les dépressions sont remplies d'eau. Il existe donc, une pluie limite de ruissellement (Plr) qui correspond à la quantité de pluie tombée nécessaire avant que ne débute

le ruissellement sur chaque technique agricole. Les valeurs des pluies limites de ruissellements des différentes techniques sont illustrées à la **Figure 3-5**. Elles ont été déterminées à partir de la représentation graphique des nuages de points lame d'eau précipitée – lame d'eau ruisselée en distinguant les points des évènements pluvieux sans ruissellement (Peugeot, 1995; Mounirou, 2012). Les pluies limites de ruissellement sont de l'ordre de 7, 10, 20 et 48 mm respectivement sur le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune.

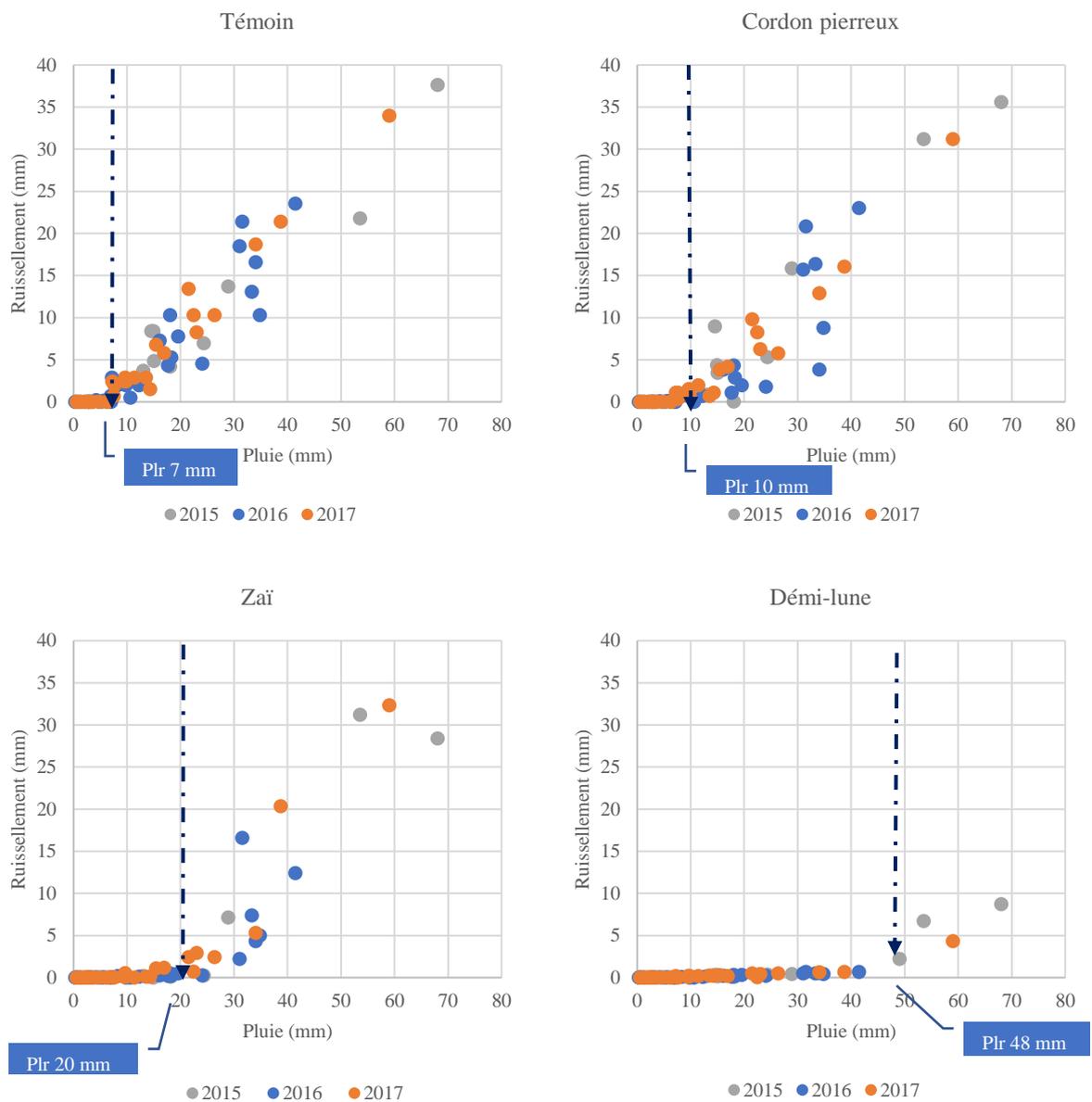


Figure 3-5: Détermination de la pluie limite de ruissellement (Plr) sur les différentes techniques agricoles.

Les résultats obtenus montrent également que les activités de sarclage impactent sur le ruissellement. En effet, la pluie de 59 mm enregistrée le 23/08/2017 survenue après le sarclage du 22/08/2017 a généré un ruissellement de 34; 32; 32 et 5 mm respectivement sur le témoin, le cordon-pierreux, le zaï et la demi-lune. La différence de ruissellement n'est pas significative entre les parcelles de zaï, de cordon-pierreux et de témoin. Ceci est probablement dû à l'effet du sarclage humide qui a permis un stockage beaucoup plus important que la normale pour les parcelles témoins et cordon pierreux, en améliorant considérablement la capacité d'infiltration du sol pendant une certaine période. En effet, le sarclage du 22/08/2017 avait précédé un évènement pluvieux de 20 mm enregistré le 21/08/2017. Ce résultat corrobore celui obtenu par Abdou et al. (2015) qui ont montré une amélioration de l'infiltration après un sarclage humide et concluent que le sarclage en conditions sèches est peu performant, à la fois en termes de conductivité et en terme de persistance de son effet.

3.2. Effet des pratiques agricoles sur les propriétés hydrauliques de surface du sol

Les mesures de conductivité hydraulique saturée ont été effectuées sur chaque parcelle avant le début de la saison des pluies (c'est-à-dire sur des sols secs). Avant la saison des pluies de 2015, toutes les valeurs de conductivités hydrauliques saturées étaient presque similaires sur l'ensemble des parcelles (**Tableau 3-2**) car les parcelles ont été installées sur le même sol sans techniques agricoles préalables. Ces résultats associés à l'uniformité de la pente de terrain, du type de sol et du profil pédologique montrent que le site expérimental appartient à la même unité géomorphologique. Cependant, les valeurs de conductivités hydrauliques saturées ont probablement été impactées par les pratiques culturales réaménagées en 2016 et 2017. En effet, sur les parcelles du bloc A, on observe une augmentation des valeurs de conductivités hydrauliques pour les parcelles de zaï (7.1 ± 1.4 cm / h), par rapport aux parcelles de cordon pierreux ($3.8 \pm 0,78$ cm / h) et témoins (4.71 ± 0.3 cm / h) où les conductivités n'ont pas changé de manière significative. Cela peut s'expliquer par la présence d'une croûte d'érosion qui persiste sur les parcelles témoins et de cordon pierreux au fil des années, mais qui semble être inexistante sur les parcelles de zaï. Par contre, la conductivité hydraulique saturée pour les parcelles de demi-lunes a diminué à $1,21 \pm 0,4$ cm / h avant la saison 2017. Cela peut être justifié par la présence de la croûte de décantation dans les cuvettes des demi-lunes avant le réaménagement au début de la période hivernale. Ces croûtes de décantation caractérisées par une forte teneur

en argile réduisent considérablement la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (Casenave et Valentin, 1989; dos Santos et al., 2016). Les observations faites sur les parcelles du bloc A, sont semblables à celles du bloc B. On note aussi une amélioration de la conductivité hydraulique sur la parcelle de zaï (6.86 ± 0.89 cm / h), par rapport à la parcelle de cordon pierreux (3.24 ± 1.94 cm / h), à la parcelle témoin (6.24 ± 0.34 cm / h) et à la parcelle de demi-lune (0.67 ± 0.54 cm / h). On remarque cependant une meilleure infiltration sur la parcelle témoin comparativement à la parcelle de cordon pierreux et aussi la valeur est proche de l'infiltration mesurée sur le zaï. Les deux mesures essais réalisés sur la parcelle témoin du bloc B pourraient être insuffisantes pour permettre une conclusion.

Tableau 3-2 : Conductivité moyenne (Ks) par techniques agricoles avant le début des saisons pluvieuses en avril 2015, 2016 et 2017.

Les écarts-types sont donnés entre parenthèses. Sur 72 mesures effectuées 2 ont été rejetées après analyses car montrant des valeurs aberrantes probablement due à un défaut de lecture ou d'installation de l'équipement.

Techniques	Bloc A			Bloc B		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Ks (cm/h)	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Témoin	3.47 (± 0.64)	3.39 (± 0.45)	4.71 (± 0.3)	4.37 (± 0.46)	4.32 (± 1.70)	6.24 (± 0.34)*
Cordon-pierreux	4.33 (± 0.91)	3.79 (± 0.82)	3.80 (± 0.78)	4.30 (± 0.78)	4.14 (± 0.30)	3.24 (± 1.94)
Zaï	4.49 (± 0.97)*	6.40 (± 0.32)	7.10 (± 1.40)	5.76 (± 1.75)	8.16 (± 0.84)	6.86 (± 0.89)
Demi-lunes	3.90 (± 0.19)	1.08 (± 0.25)	1.21 (± 0.40)*	3.77 (± 0.20)	1.98 (± 0.49)	0.67 (± 0.54)

* (2) répétions

La détermination des différents paramètres hydrauliques de surface du sol sous différentes succions en relation avec les différentes techniques agricoles a été menée avant la saison des pluies en avril 2016. Les paramètres hydrauliques déterminés afin de mieux expliquer le comportement hydraulique des différentes techniques sont : la sorptivité, la conductivité hydraulique non saturée et la taille moyenne des pores actifs. D'une manière générale, on note une amélioration de la conductivité hydraulique non saturée et de la taille moyenne des pores fonctionnels sur le zaï quel qu'en soit la succion imposée. Les plus fortes valeurs de conductivités se rencontrent sur les parcelles de zaï (11.59 ± 0.64 cm/h), tandis que les plus faibles se retrouvent sur les parcelles témoin et demi-lune (0.83 ± 0.31 cm/h). Le **Tableau 3-3** présente les caractéristiques hydrodynamiques des sols soumis à différentes techniques

agricoles. Il montre que pour une succion de -40 mm, la conductivité non saturée est de 2.21 (\pm 1.21), 2.64 (\pm 0.83), 7.06 (\pm 1.04), 1.2 (\pm 0.65) cm/h et la taille moyenne des pores actifs correspondante est de 0.027 (\pm 0.010), 0.040 (\pm 0.012), 0.130 (\pm 0.026), 0.017 (\pm 0.002) mm respectivement pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune (cas du bloc A). Ainsi, on note une amélioration de la conductivité hydraulique d'un facteur de 3 sur le zaï par rapport au témoin. Quant à la demi-lune, cette conductivité est réduite de 45% par rapport au témoin.

Sur le cordon-pierreux l'amélioration de l'infiltration n'est pas significative. Ce comportement des techniques agricoles par rapport à la conductivité hydraulique non saturée est similaire à la conductivité hydraulique saturée.

La caractérisation du diamètre des pores actifs selon les travaux de Landon (1991) a permis de classer les tailles des pores par rapport au travail du sol. Ainsi, les pores grossiers ont un diamètre supérieur 0.1 mm, les pores moyens varient de 0.03 à 0.1 mm et les micros pores généralement rencontrés sur des sols à semis direct ont un diamètre inférieur 0.03 mm. Ces pores jouent un rôle important dans la dynamique de l'eau dans le sol. La **Figure 3-6** montre qu'il existe une relation entre la taille des pores fonctionnels et la conductivité hydraulique. L'infiltration est plus grande sur les techniques de zaï du fait de l'importance des pores mobilisés, ce qui n'est pas le cas sur la parcelle de demi-lune. Les parcelles témoins et de cordon-pierreux affichent une infiltration intermédiaire. Aussi, les pores mobilisés sont d'autant plus importants que lorsque la charge de pression est faible pour toutes les techniques (**Tableau 3-3**). L'infiltration est plus importante pour les succions proches de la saturation (-20 mm). Ces résultats nous montrent que lorsque le sol est proche de la saturation, les pores mobilisés sont plus importantes d'où la forte infiltration.

La sorptivité mesurée sur les différentes parcelles varie de 0.53 (\pm 0.03) à 0.76 (\pm 0.06) mm.s^{-1/2} sur les parcelles témoins ; de 0.36 (\pm 0.03) à 0.83 (\pm 0.15) mm.s^{-1/2} sur les parcelles de cordon-pierreux ; de 0.45 (\pm 0.05) à 0.80 (\pm 0.10) mm.s^{-1/2} sur les parcelles de zaï et de 0.56 (\pm 0.06) à 1.36 (\pm 0.20) mm.s^{-1/2} sur les parcelles de demi-lunes. Les demi-lunes ont montré ainsi une plus grande sorptivité par rapport aux autres techniques.

Tableau 3-3 : Nombre de mesures retenues, sorptivité (S), conductivité hydraulique moyenne (K) et taille moyenne des pores actifs (λ_m) pour différentes succions et par techniques agricoles avant le début des saisons pluvieuses en avril 2016. Les écarts-types sont donnés entre parenthèses. La détermination de la taille moyenne active de la demi-lune à la succion - 60cm n'a pas pu être réalisée à cause d'une erreur d'échantillonnage faite sur les cylindres de prélèvement. Les humidités n'ont donc pas pu être évaluées. Les autres erreurs sont dues à un défaut de contact du TRIMS avec le sable.

Parcelles agricoles	Répétitions	Succion (mm)	S (mm.s ^{-1/2})	K (cm/h)	λ_m (mm)
Témoin A	3	-20	0.63 (\pm 0.22)	3.22 (\pm 1.64)	0.025 (\pm 0.082)
	3	-40	0.63 (\pm 0.07)	2.21 (\pm 1.21)	0.027 (\pm 0.010)
	2	-60	0.55 (\pm 0.05)	1.47 (\pm 0.65)	0.013 (\pm 0.004)
Témoin B	3	-20	0.76 (\pm 0.06)	6.03 (\pm 0.75)	0.074 (\pm 0.026)
	2	-40	0.58 (\pm 0.06)	4.89 (\pm 0.84)	0.025 (\pm 0.022)
	3	-60	0.53 (\pm 0.03)	2.86 (\pm 0.81)	0.035 (\pm 0.016)
Cordon pierreux A	3	-20	0.73 (\pm 0.11)	4.47 (\pm 1.30)	0.060 (\pm 0.016)
	3	-40	0.56 (\pm 0.05)	2.64 (\pm 0.83)	0.040 (\pm 0.012)
	3	-60	0.61 (\pm 0.07)	2.42 (\pm 0.77)	0.042 (\pm 0.005)
Cordon pierreux B	2	-20	0.83 (\pm 0.15)	7.47 (\pm 1.00)	0.065 (\pm 0.020)
	3	-40	0.55 (\pm 0.12)	1.60 (\pm 0.57)	0.033 (\pm 0.015)
	3	-60	0.36 (\pm 0.03)	1.17 (\pm 0.30)	0.026 (\pm 0.005)
Zaï A	2	-20	0.70 (\pm 0.15)	9.08 (\pm 0.97)	0.132 (\pm 0.039)
	3	-40	0.65 (\pm 0.13)	7.06 (\pm 1.04)	0.130 (\pm 0.026)
	3	-60	0.49 (\pm 0.09)	3.42 (\pm 1.30)	0.106 (\pm 0.016)
Zaï B	2	-20	0.80 (\pm 0.10)	11.59 (\pm 0.64)	0.156 (\pm 0.068)
	3	-40	0.50 (\pm 0.10)	9.58 (\pm 1.27)	0.092 (\pm 0.031)
	3	-60	0.45 (\pm 0.05)	4.43 (\pm 0.99)	0.063 (\pm 0.007)
Demi-lune A	3	-20	1.00 (\pm 0.10)	4.06 (\pm 0.72)	0.012 (\pm 0.003)
	3	-40	0.69 (\pm 0.1)	1.2 (\pm 0.65)	0.017 (\pm 0.009)
	3	-60	0.60 (\pm 0.09)	0.83 (\pm 0.31)	0.008 (\pm 0.001)
Demi-lune B	2	-20	1.36 (\pm 0.20)	9.05 (\pm 2.07)	0.022 (\pm 0.002)
	3	-40	0.63 (\pm 0.15)	2.24 (\pm 0.90)	0.017 (\pm 0.002)
	3	-60	0.56 (\pm 0.06)	1.17 (\pm 0.41)	Erreur d'échantillonnage

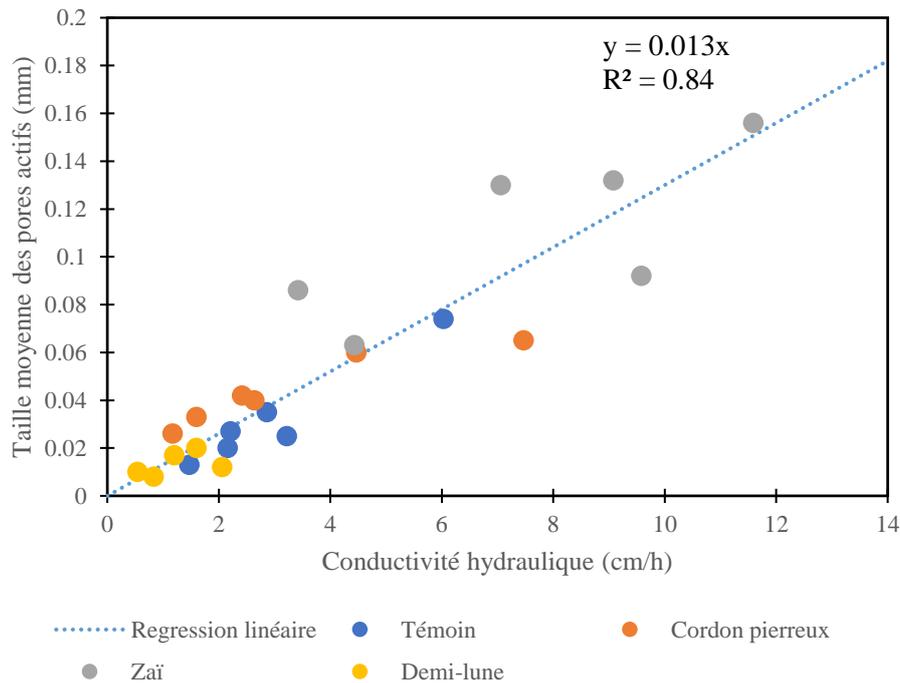


Figure 3-6: Relation entre la taille moyenne des pores fonctionnels et la conductivité hydraulique selon les différentes techniques agricoles

En zone sahélienne, la production agricole est conditionnée par l’approvisionnement continu en eau durant le cycle de la plante. L’eau stockée dans le sol, pour les besoins hydriques de la plante est une condition nécessaire pour assurer des rendements agricoles pendant la saison pluvieuse. Il est nécessaire dans un contexte de forte variabilité pluviométrique d’assurer un meilleur stockage de l’eau dans le sol afin de pouvoir assurer les besoins en eau des plantes même lors des périodes sans précipitations. Les stratégies efficaces sont le contrôle de l’infiltration qui augmente le stock d’eau du sol et limite les pertes par ruissellement et par évaporation. Les techniques de conservation des eaux et des sols affectent différemment les paramètres hydrauliques de surface du sol.

Les techniques agricoles induisent une redistribution spatiale des croûtes à la surface du sol (Biielders et al., 1996; Ndiaye et al., 2005) et modifient ainsi, les propriétés hydrauliques de surface du sol. Les processus d’éclaboussures des agrégats, l’arrachement, le transport et le dépôt des particules régissent la formation des types de croûtes. La bande d’argile exposée à la surface du sol est souvent attribuée aux dépôts de matières fines provenant des eaux troubles à la fin de la pluie (Casenave and Valentin, 1989; Biielders et al., 1996). En effet, une croûte de décantation se forme pendant la saison des pluies à l’intérieur des demi-lunes comme également

rapportés par certains auteurs (Jasmin et al., 2015; WOCAT, 2016b; Kagambèga et al., 2017). Ces changements sont attribués à la grande capacité de rétention des demi-lunes, qui peuvent retenir l'eau pendant des périodes prolongées et peuvent être plus sujettes à la sédimentation par le dépôt lent de particules par un tri granulométrique. Ces croûtes de décantation caractérisées par une forte teneur en argile réduisent fortement l'infiltration (Casenave et Valentin, 1989; dos Santos et al., 2016). La taille moyenne des pores mesurée dans les demi-lunes est inférieure à 0.03 mm caractéristique des pores de petite taille en raison de la forte teneur en argile, justifiant ainsi la sorptivité élevée mesurée dans la cuvette (la pression interstitielle étant plus élevée dans les sols argileux). Cette réorganisation des particules solides à la surface de la cuvette laissant une couche d'argile en surface explique la réduction de l'infiltration dans la demi-lune (les argiles étant gonflantes créant ainsi, une discontinuité poreuse). Toutefois dans cette étude, l'accumulation d'argile n'a pas été observée dans les dépressions de zaï. Dans les poquets de zaï, les couches observées sont principalement constituées de sable. Les travaux de Bielders et al. (1996) sur la distribution spatiale des croûtes de surface induites par le travail du sol, ont permis d'observer l'absence de croûtes d'argile en zone de dépressions exposées à une lame d'eau de ruissellement. Les particules fines étant transportées par le ruissellement limitant ainsi le taux d'érosion par les dépressions. Ils ont caractérisé ces zones de croûtes structurales et de ruissellement car principalement constituer de sable. Les mêmes processus de ruissellement et de captage des éléments grossiers ont été observés sur les parcelles de zaï. La caractérisation des propriétés hydrauliques de surface des techniques de zaï a montré une amélioration de l'infiltration en relation avec les pores grossiers dont le diamètre fonctionnel est supérieur 0.1 mm (**Figure 3-6**). Sur les parcelles témoins et cordon pierreux, on constate le développement d'une croûte d'érosion persistante due au compactage par les gouttes de pluies et au transport des éléments fin par l'effet du ruissellement après sarclage. Ndiaye et al. (2005) montrent que la surface sarclée peut évoluer en croûte d'érosion lorsque la surface est lessivée par le ruissellement après les éclaboussures des agrégats du sol.

Des preuves visuelles de l'aptitude du zaï à infiltrer l'eau dans le sol et du rôle que joue l'encroûtement du sol sur l'infiltration ont été mises en évidence en prenant des photographies après un évènement pluviométrique de 124 mm en juillet 2015 (**Figure 3-7**). On a constaté que 6h de temps après la pluie, toute l'eau s'est infiltrée dans le sol pour les parcelles de zaï. Par contre, 2 jours après la pluie, de l'eau était toujours présente dans les demi-lunes. Le sable piégé dans une fine couche d'argile est perceptible dans le zaï tandis que la demi-lune présente une couche importante d'argile qui se rétracte après séchage. La présence des croûtes est organisée

selon le modèle proposé par Biielders et al. (1996). Les croûtes structurales et de ruissellement sont présentes dans le zaï (petites dépressions), les croûtes de décantation sont observées dans les demi-lunes et les croûtes d'érosion dans la parcelle témoin et de cordon-pierreux. Une croûte de décantation est observée au voisinage du cordon-pierreux.



Figure 3-7: Eau stagnante dans la demi-lune (en haut, à gauche) et poquet de Zaï (en bas, à gauche), 2 jours après une pluie de 124 mm en juillet 2015. Croûte de décantation dans la demi-lune (en haut, à droite), et du sable piégé dans une fine couche d'argile dans le poquet de Zaï (en bas, à droite). Photo: Zouré Cheick Oumar.

Dans le but de supporter nos observations, des échantillonnages de sol ont été faits à la surface des différentes parcelles (au milieu de la parcelle témoin, à 1 m de la ligne du cordon pierreux, et dans les dépressions de zaï et de demi-lune) pour apprécier la texture du sol. Les résultats confirment nos constatations. En surface, la demi-lune enregistre des quantités d'argiles (39%) importantes comparativement au zaï (17%), au cordon-pierreux (28%) et au témoin (31%). Les études de Kagambèga et al. (2017) sur les effets des techniques CES sur les propriétés des sols dégradés au Burkina Faso, ont indiqué une répercussion significative des techniques à modifier la texture du sol, avec une augmentation particulière des argiles dans les systèmes de demi-lunes. Ils trouvent ainsi, après trois années d'expérimentations une proportion d'argile de 24.7%

dans des demi-lunes de 2m de diamètre comparativement au zaï où la proportion d'argile est de 18.1 % après trois années d'expérimentation. Ces résultats démontrent de la sensibilité de la demi-lune à augmenter le taux d'argile à la surface du sol. La **Figure 3-8**, montre les proportions texturales mesurées à la surface des différentes techniques agricoles dans le cadre de notre étude.

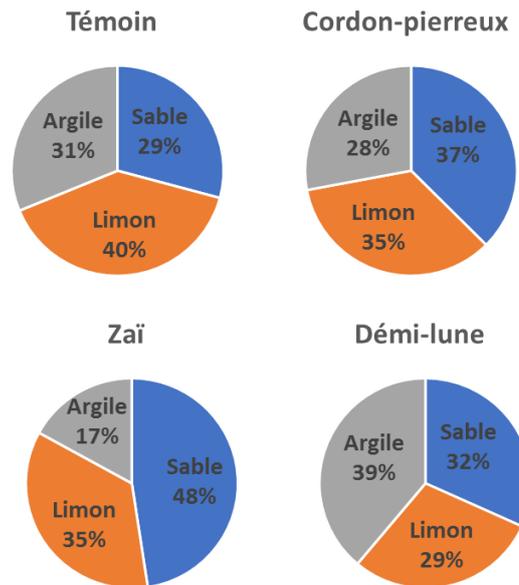


Figure 3-8: Analyse granulométrique réalisée à la surface des différentes techniques agricoles (Prélèvement d'échantillon fait à la date du 05-09-2017)

En ce qui concerne la texture du sol (**Figure 3-8**), la différence entre les traitements est liée à leur sensibilité à l'érosion à travers les pertes d'eaux et de sols par ruissellement. Ensuite, l'augmentation du taux d'argile dans la demi-lune comparativement aux autres techniques pourrait s'expliquer par la perte des particules fines due à l'érosion du sol, ce qui est plus marqué sur la parcelle de zaï (Kagambèga et al., 2017). La taille des poquets de zaï relativement plus petite occasionne le transport des éléments fins par suspension tandis que les éléments grossiers charriés sont piégés dans les poquets (Bielders et al., 1996).

3.3. Effet des pratiques agricoles sur l'humidité et la charge de pression du sol

L'effet des techniques CES sur les variables d'états a été apprécié à partir des mesures quotidiennes de l'humidité volumique et de la charge de pression de l'eau du sol. Rappelons que ces mesures ont été réalisées à partir du mois de septembre 2015, si bien que nous ne disposons que deux années complètes de données (2016 et 2017). Il faut aussi retenir que les mesures ont été réalisées de façon ponctuelle au milieu de chaque parcelle.

3.3.1. Evolution temporelle de l'humidité volumique

Les **Figures 3-9 et 3-10** montrent l'évolution temporelle de l'humidité volumique mesurée aux profondeurs 10, 50 et 100 cm sur les différentes techniques agricoles en 2016 et 2017. Seuls les données d'humidité des parcelles du bloc A sont présentées. Les données d'humidité du bloc B sont présentées en **Annexe 3**. On observe d'une manière générale, l'influence des techniques culturales sur le stockage de l'eau dans le sol en réponse à un régime pluviométrique donné. Dans les horizons supérieurs du sol (50 premiers centimètres), l'humidité du sol s'est révélée être très sensible aux précipitations, augmentant après chaque événement pluviométrique et diminuant rapidement pendant la période sèche. Cette variation de l'humidité n'est pas perceptible à 1 m de profondeur de la surface du sol. En 2016, par exemple, la pluviométrie était abondante et bien répartie dans la première partie de la campagne (03/07-30/08/2016) améliorant ainsi, l'humidité du sol sur toutes les pratiques, plus particulièrement sur les parcelles de cordon-pierreux, de zaï et de demi-lunes. Dans la seconde partie de la campagne (30/08 - 14/10/2016), la pluviométrie était irrégulière et caractérisée par 3 séquences sèches d'au moins 10 jours chacune. Cette irrégularité des pluies a contribué à une forte diminution de l'humidité sur toutes les parcelles exceptée la parcelle de demi-lune (**Cf. section 3.3.2**). L'humidité du sol est plus importante lors des périodes bien arrosées et après les dates de sarclage (20/07/2016 ; 18/08/2016 ; 26/07/2017 et 22/08/2017).

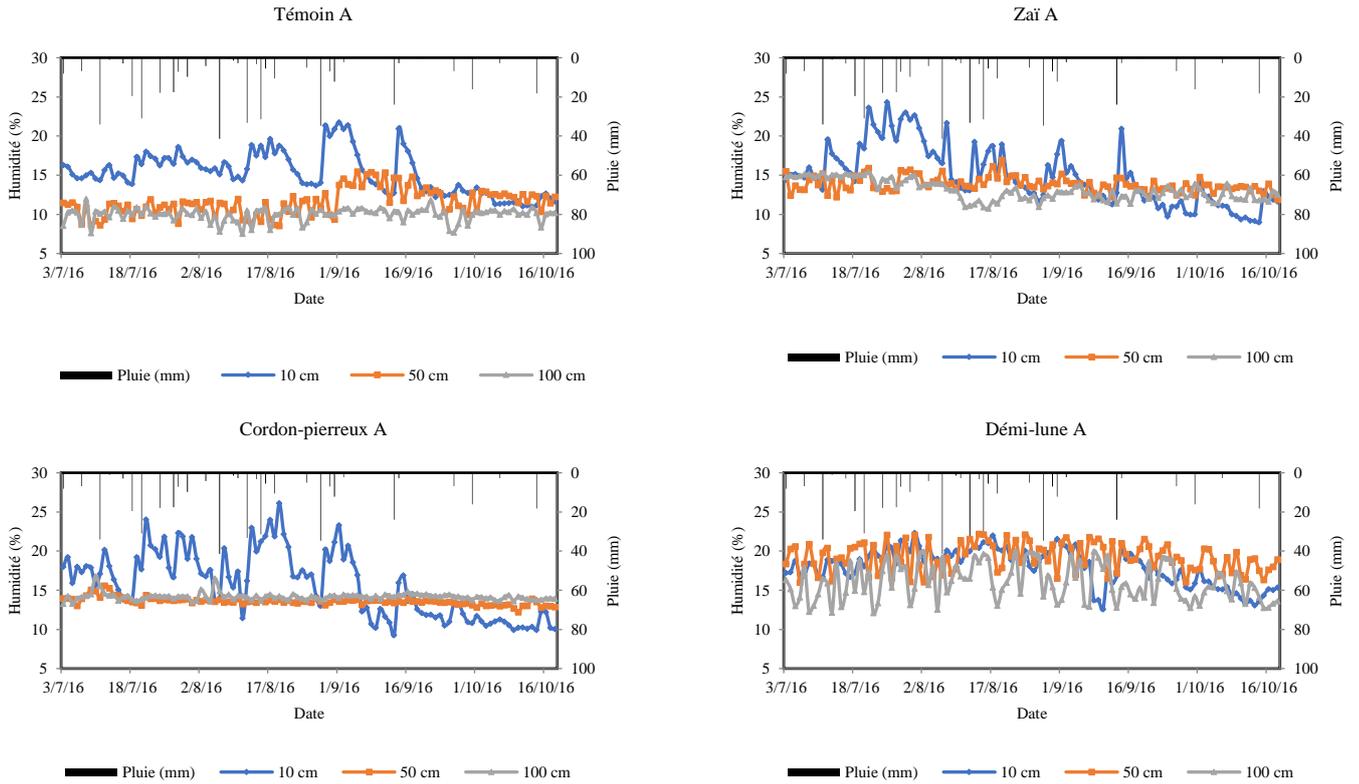


Figure 3-9 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs (10, 50 et 100cm) selon les techniques CES en 2016. Les opérations de sarclage ont eu lieu respectivement le 20/07/2016 et le 18/08/2016

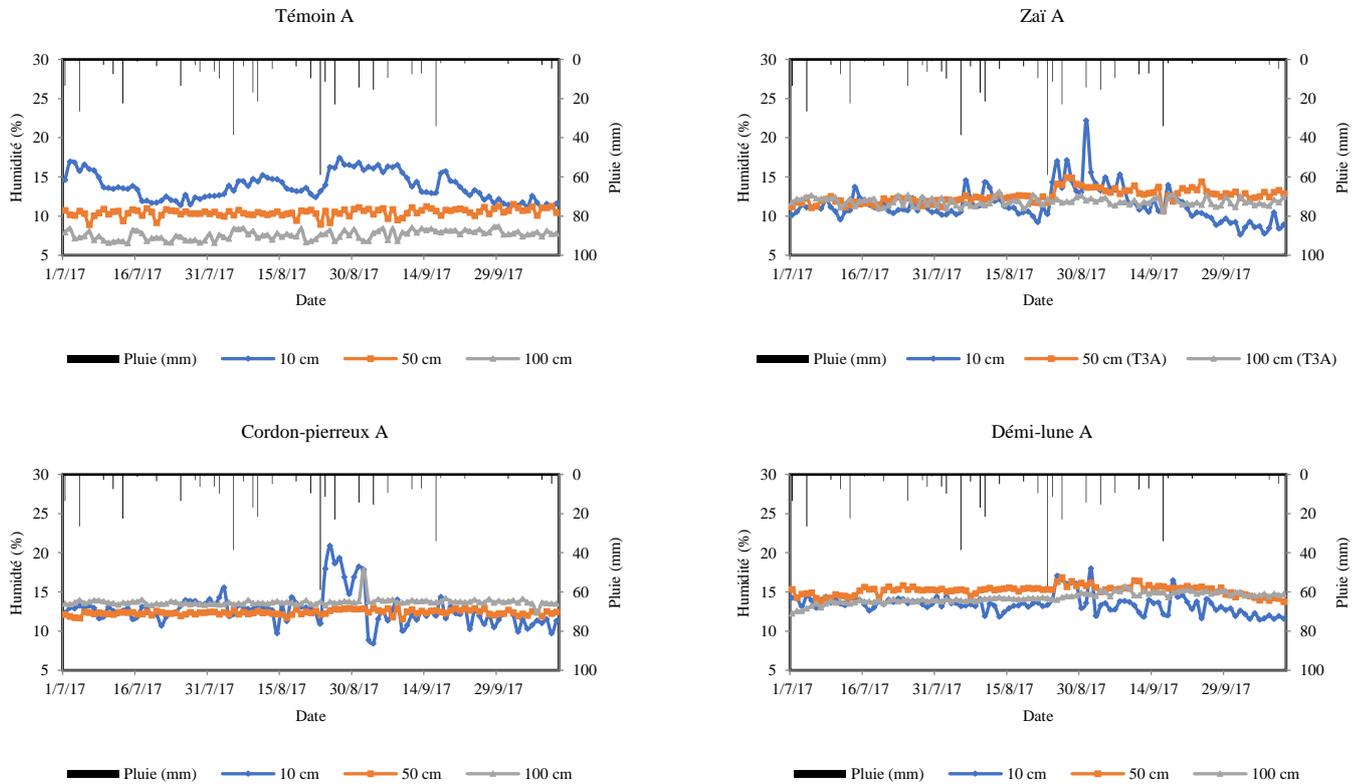


Figure 3-10 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs (10, 50 et 100cm) selon les techniques CES en 2017. Les opérations de sarclage ont eu lieu respectivement le 26/07/2017 et le 22/08/2017.

3.3.2. Profils d'humidité du sol

Les mesures journalières des profils d'humidité sur chaque parcelle tout au long de la saison des pluies montrent également une certaine influence des pratiques agricoles sur la dynamique de l'infiltration. La **Figure 3-11** montre les profils hydriques mesurés sur les différentes techniques agricoles du bloc A en 2016. L'évolution des profils hydriques observés sur les parcelles du bloc B est similaire à celle des parcelles du bloc A. Sur la parcelle témoin, l'humidité évolue entre 10 et 23%, mais cette variation est limitée à une profondeur de 50 cm. La propagation du front d'humectation a augmenté de l'ordre de 30 cm (profondeur de 80 cm) sur les cordons pierreux et le zaï, ce qui démontre une infiltration accrue permise par l'effet de collecte et de rétention d'eau de ces techniques sur le ruissellement de surface. La technique du zaï est plus efficace que celle du cordon pierreux en termes de stockage de l'eau dans la zone racinaire, les valeurs d'humidité étant les plus élevées entre les profondeurs 20 et 60 cm. Les valeurs d'humidités sur le cordon pierreux sont nettement meilleures que le témoin. Cela s'explique par le fait que les mesures d'humidités se font proches et en amont du cordon pierreux. On relève également un comportement très différent dans les profils d'humidité de demi-lune, avec une variabilité fortement réduite en surface et en profondeur (15-24% d'humidité). Il est à rappeler que les profils ne sont pas directement mesurés à l'intérieur des creux, mais entre les rangées. Par conséquent, nous avons observé que la dynamique de l'humidité dans la demi-lune est moins ample. Comme la conductivité hydraulique est faible et que les cuvettes sont largement espacées, le transfert latéral n'est pas significatif et le profil hydrique du sol, mesuré entre deux demi-lunes peut être beaucoup plus sec qu'un profil mesuré directement dans la cuvette. Le mécanisme prépondérant des demi-lunes réside dans leur capacité à retenir d'importants volumes de ruissellement, qui s'infiltrent lentement, mais pendant de longues durées. Cela fournit un apport d'eau plus constant et plus conséquent, ce qui permet une progression plus profonde de l'humidité du sol. Les profils hydriques mesurés sur les différentes techniques agricoles du bloc A en 2017 sont présentées en **Annexe 4**.

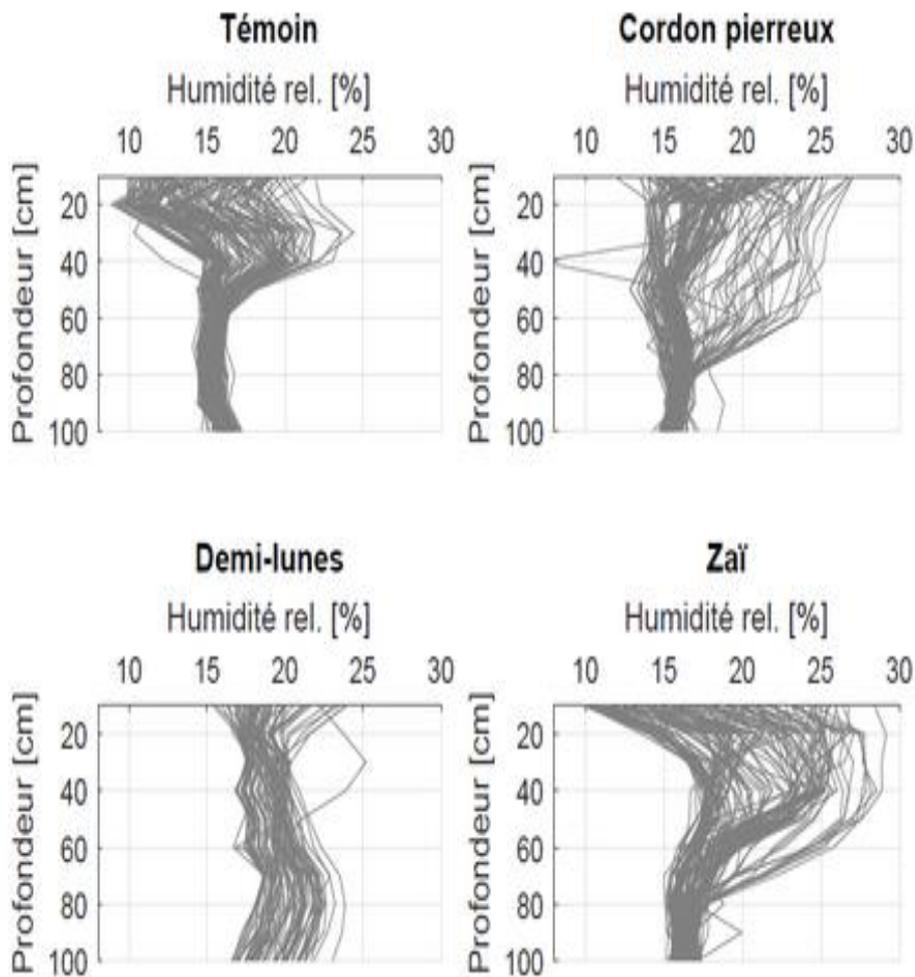


Figure 3-11: Vue d'ensemble de l'évolution temporelle des profils hydriques pour chaque type de pratique agricole en 2016. Chaque ligne grise représente le profil d'humidité depuis la surface du sol jusqu'à 1 m de profondeur mesuré tous les jours pendant la saison des pluies. Les profils d'humidités enregistrés en 2016 présentent les mêmes comportements que ceux observés en 2017.

3.3.3. Evolution temporelle de la charge de pression

L'évolution temporelle de la charge de pression (h) de l'eau du sol enregistrée sur les différentes pratiques agricoles en 2016 est présentée à la **Figure 3-12**. Au vu des conditions sèches du sol (irrégularité des pluies, températures élevées, fortes demandes évaporatoires), les cannes tensiométriques n'ont pas souvent fonctionné du fait de la discontinuité du milieu liquide. Sur les parcelles témoins, cordons pierreux et zaï, les valeurs des cannes tensiométriques situées aux profondeurs 120 cm n'ont très souvent pas pu être mesurées à cause du faible niveau d'humidité du sol. Toutefois, l'absence de variation d'humidité en dessous de 80 cm indique

un drainage négligeable. Sur les parcelles témoins, de cordons pierreux et de zaï, les charges de pression restent importantes à la profondeur de 120 cm ($h > -400$ cm) comparativement aux profondeurs 60 et 20 cm ($h > -150$ cm). Cependant, sur les parcelles de demi-lunes, les charges de pression ne sont pas différenciées quelle que soit la profondeur considérée. Ce comportement témoigne de l'humidité constante observée sur ces dernières du fait du stockage prolongé de l'eau dans les cuvettes. Ces mesures traduisent l'évolution du profil d'humidité à la limite de 80 cm sur le cordon-pierreux et le témoin, mais pouvant progresser au-delà de ce seuil sur les parcelles de zaï et de demi-lunes. On constate également que sur le zaï et les demi-lunes les charges de pressions tendent à diminuer fortement avec l'installation de la saison pluvieuse et les valeurs redeviennent importantes à la fin de la saison. Les dépressions soutiennent une humidité à plus long terme dans le sol comparativement aux techniques de cordon-pierreux et du semi-direct (témoin).

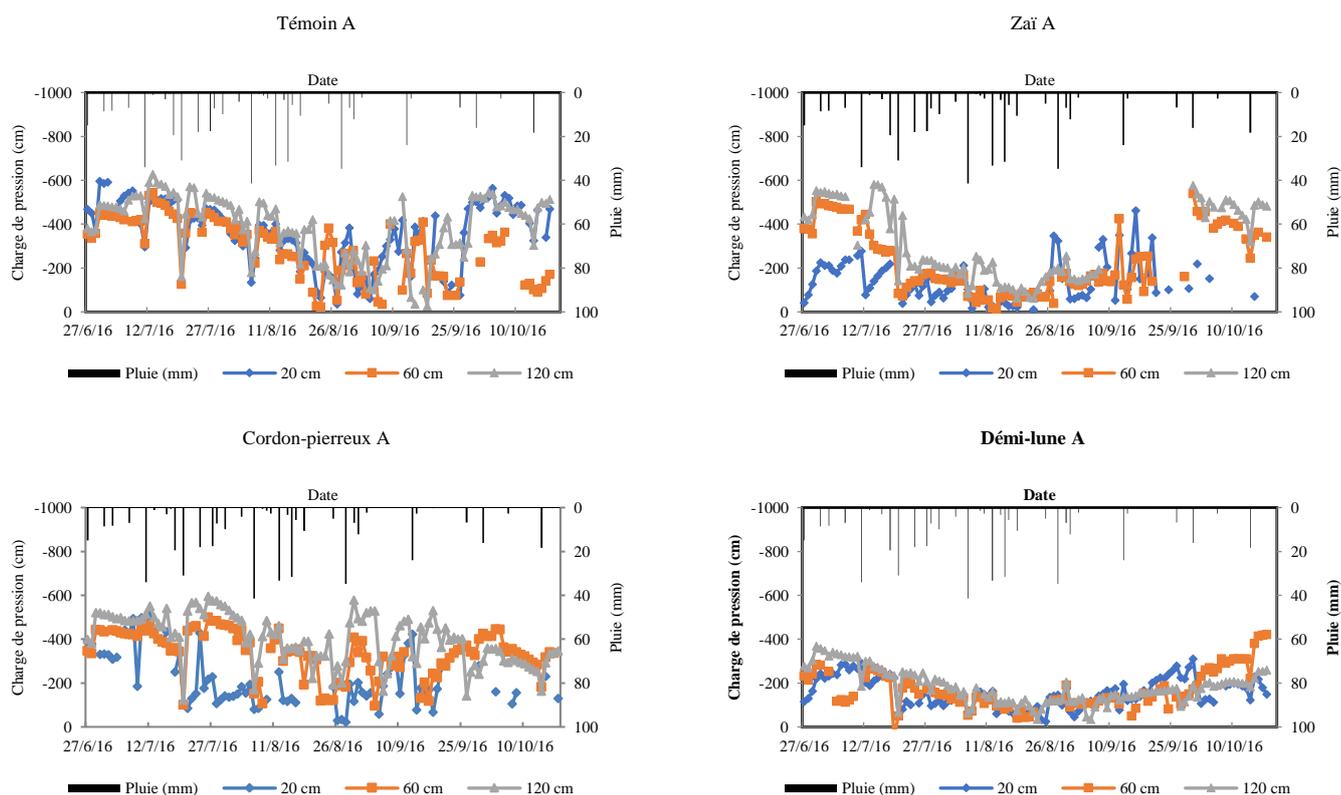


Figure 3-12 : Evolution temporelle des charges de pressions à différentes profondeurs (20, 60 et 120 cm) sur les différentes techniques agricoles en 2016

La **Figure 3-13** présente l'évolution temporelle du gradient de charge hydraulique entre 80 et 120 cm de profondeur du sol pour les techniques de semis direct et de zaï. Les valeurs des charges de pression sont mesurables uniquement lorsque le sol est suffisamment humide. L'existence de gradients négatifs indique une propagation de l'humidité au-delà de la profondeur de référence. On note rarement des gradients positifs qui n'ont engendré que de très faibles apports par des remontées capillaires probablement dues à l'activité racinaire. Les pertes d'eau par ruissellement sur les parcelles témoins (absence de rugosité) et la faible valeur de conductivité hydraulique ($K_{sat} = 1.8$ mm/h) à la profondeur de 1m du sol, limitent l'évolution de l'humidité au voisinage de 50 cm du sol. Par contre, l'accumulation de l'eau à la surface des parcelles aménagées (amélioration des propriétés physiques, hydrauliques et biologiques) assure une meilleure humidification du profil hydrique du sol comparativement à la parcelle témoin et occasionne ainsi des situations de drainage en profondeur du sol pour les techniques de cordon-pierreux, zaï et demi-lune. Cette propagation de l'humidité est d'autant plus importante sur les demi-lunes à cause de sa grande capacité à collecter l'eau et à l'infiltrer lentement dans le sol gardant ainsi le profil humide le plus longtemps possible.

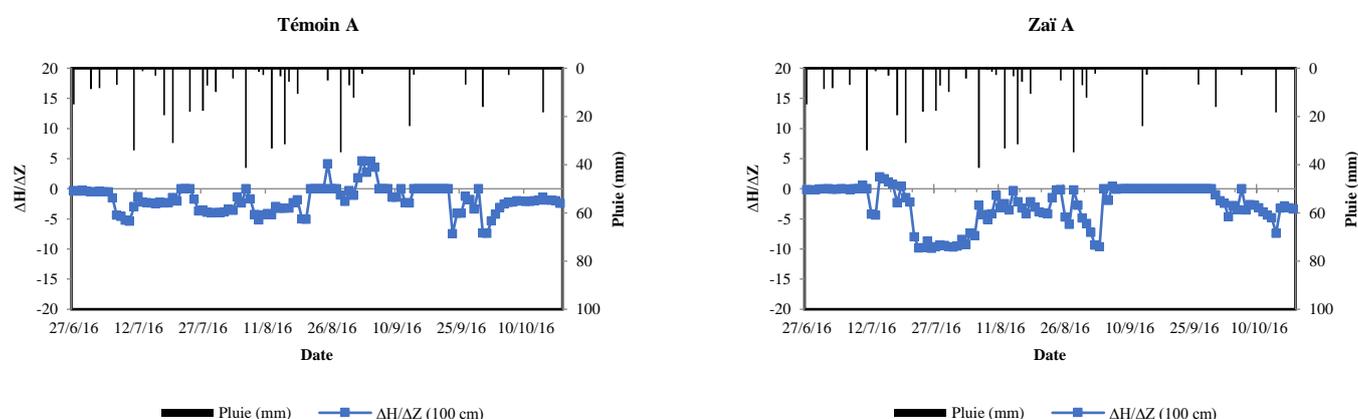


Figure 3-13: Evolution temporelle du gradient de charge hydraulique entre 80 et 120 cm de profondeur du sol pour les techniques du semis direct et du zaï durant l'année 2016.

4. Conclusion partielle

Ce chapitre visait à évaluer les performances hydrologiques des techniques agricoles à travers la capacité des techniques à réduire le ruissellement et l'effet des techniques sur les propriétés hydrodynamiques du sol. Les techniques CES ont montré une forte capacité à réduire le ruissellement. Comparativement à la technique de semis direct, les parcelles de cordons pierreux, de zaï et de demi-lune entraînent une réduction de 25 %, 55% et 95% du ruissellement. La performance des techniques CES à réduire le ruissellement est principalement contrôlée par la capacité d'accumulation de l'eau induite par les différentes caractéristiques techniques. Aussi, les techniques CES modifient des propriétés hydrauliques du sol par une redistribution spatiale des croûtes à la surface du sol. Les parcelles de zaï ont ainsi occasionné le développement d'une macroporosité à la surface des poquets améliorant ainsi l'infiltration en réduisant davantage le ruissellement. Quant aux parcelles de demi-lunes, du fait de ses cuvettes, elles ont induit des pores de petites tailles réduisant la vitesse d'infiltration de l'eau à travers le sol occasionnant ainsi une infiltration lente, continue et profonde. La capacité d'infiltration n'a pas changé de manière significative sur le semis direct et le cordon pierreux.

Les parcelles de zaï et de demi-lunes présentent les plus grandes teneurs en eau du sol comprises entre 15-25% et des charges de pression relativement faibles atteignant – 50 cm. Ces meilleures conditions de d'accumulation d'eau, d'infiltration, d'humidité et de charge de pression du sol induites par l'implémentation des techniques CES ont favorisé une évolution de l'humidité en-dessous de -80 cm de la surface du sol pour les techniques de zaï et cordon pierreux et plus de -1 m pour la technique de demi-lune, couvrant ainsi une partie de la zone racinaire du mil pouvant atteindre 2 m.

Chapitre 4 : Elaboration d'un outil de simulation de l'impact des techniques agricoles sur le stockage en eau du sol

Ce chapitre propose l'adaptation du modèle hydrologique SCS-CN de l'USDA, pour permettre de mesurer significativement l'impact des techniques culturales sur le bilan hydrologique des sols. Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'un article scientifique publié dans la revue **Catena** (Zouré et al., 2019) dont le titre est « **Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in northern Burkina Faso** » (Cf. publications).

1. Introduction

Dans le contexte actuel de résilience face aux changements climatiques au Sahel, il est important de pouvoir comprendre l'aptitude des techniques à conserver l'eau dans le sol pour soutenir de façon durable la production agricole. La compréhension des processus hydrologiques peut aider à l'élaboration d'un outil de prévision du stockage de l'eau dans le sol en fonction du régime climatique et des spécificités des techniques agricoles. En réalité, la formation du ruissellement dépend de la capacité de stockage du sol et de la capacité d'accumulation en eau de surface par les techniques agricoles. Les pratiques agricoles constituent une surface de collecte des eaux susceptibles de limiter le ruissellement et augmenter le stockage de l'eau du sol (Wildemeersch et al., 2015; Zouré et al., 2019). La nature du sol définit la conductivité hydraulique d'un sol qui est sa capacité à se laisser traverser par de l'eau. Cette capacité à infiltrer l'eau dans le sol peut être modifiée par les pratiques agricoles (Abdou et al., 2015; Niang et al., 2017).

Dans le but d'évaluer l'impact des différentes techniques agricoles et du régime climatique sur le stockage en eau du sol, la modélisation pourrait être un outil nécessaire, car la variabilité climatique ne peut pas être contrôlée et de nombreux processus (topographie et rugosité de la parcelle, front d'humectation, potentiel de charge et teneur en eau initiale avant la pluie, etc.) ne sont pas facilement mesurables. Pour ce faire, un modèle continu qui reproduit les processus hydrologiques permettrait de simuler les composantes du bilan hydrologique du sol. Ces processus englobent la collecte de l'eau par les techniques, de transfert et le stockage de l'eau dans le sol et les reprises d'eau pendant les périodes inter-événements.

Dans ce chapitre 4, un modèle hydrologique est développé afin de simuler le ruissellement et prévoir le comportement du stock d'eau du sol en fonction de la technique agricole et de la variabilité climatique. Nous avons également discuté des performances hydrologiques des pratiques agricoles en fonction de la variabilité climatique et de leur lien avec la production agricole.

2. Généralité sur la modélisation hydrologique

Un modèle est une représentation simplifiée et schématisée d'un phénomène complexe (Charlier, 2007). Il permet la mise en place de scénarios orientant la prise de décisions pour une problématique donnée. Un modèle est utilisé pour comprendre, démontrer ou améliorer les performances d'un système. En raison de la simplification, un modèle peut aider à comprendre et analyser les problèmes dans la réalité, mais la simplification rend également difficile la représentation d'une partie de la réalité (Murthy et al., 2004). Il existe différents types de modèles suivant l'algorithme décrivant les processus, l'échelle spatiale et temporelle et selon la connaissance ou non des paramètres et variables d'entrées du modèle (Karambiri, 2003; Merritt et al., 2003; Pandey et al., 2016).

2.1. Types de modèles hydrologiques

On distingue trois catégories principales de modèle hydrologique dépendant des processus physiques simulés et de l'algorithme du modèle décrivant ces processus. On distingue les modèles empiriques, conceptuels et à base physiques.

Les modèles empiriques sont généralement les plus simples. Elles reposent principalement sur l'analyse des observations et cherchent à caractériser la réponse hydrologique à partir de ces données (Wheater et al., 1993). Les exigences en termes de calcul et de données pour ces modèles sont généralement moindres que les autres modèles. La caractéristique principale d'un modèle empirique est qu'il n'est basé sur aucun processus de fonctionnement général du système. Une relation mathématique est développée avec des coefficients convertissant les entrées en sorties de manière à reproduire les observations. Les valeurs des paramètres des modèles empiriques peuvent être obtenues par étalonnage. De tels modèles sont généralement basés sur l'hypothèse de la stationnarité; c'est-à-dire qu'il est supposé que les conditions sous-jacentes restent inchangées pendant la durée d'étude. Cette hypothèse limite la possibilité

d'appliquer de tels modèles pour prévoir les effets du changement d'un paramètre du sol. Les modèles empiriques ont également tendance à ne pas réagir à certains événements pluviométriques, ignorant les processus de ruissellement sur le domaine de modélisation. Néanmoins, les modèles empiriques sont souvent utilisés de préférence aux modèles plus complexes, car ils peuvent être mis en œuvre dans des situations avec des données et des paramètres d'entrée limités, et sont particulièrement utiles comme première étape pour identifier les sources de génération du ruissellement (Merritt et al., 2003).

Les modèles conceptuels jouent un rôle intermédiaire entre les modèles empiriques et les modèles physiques (Beck, 1987). Dans les modèles conceptuels, le bassin est comme une entité spatiale dont la structure est un assemblage de réservoirs interconnectés représentant par exemple la végétation, la surface et les horizons du sol. L'équation du bilan et la loi de conservation de l'eau relient les flux entrants et sortants. Les composantes du cycle de l'eau peuvent être correctement simulées, mais les paramètres utilisés sont souvent sans grande signification physique, rendant ainsi l'interprétation des processus limitée. Ces modèles ont l'avantage d'être parcimonieux, car la plupart requièrent seulement 3 ou 4 paramètres de calage (Merritt et al., 2003; Charlier, 2007; Pandey et al., 2016).

Les modèles à base physiques sont établis à partir des équations physiques fondamentales et leurs solutions décrivent les flux dans un bassin versant. Les équations de conservations de masse et de quantité de mouvement sont les équations standards utilisées dans ces modèles. Ces modèles expliquent les mécanismes essentiels contrôlant le ruissellement tout en intégrant les caractéristiques physiques du bassin (topographie, pratiques agricoles, climat, croissance des plantes, etc.). Les modèles à base physiques nécessitent beaucoup plus de données d'entrées supposées mesurables pour permettre la simulation. Ces données quand, elles ne sont pas connues doivent être calibré où trouvé dans la littérature. Ceci crée des incertitudes supplémentaires sur les valeurs des paramètres utilisées et ne garantissent pas forcément les meilleurs résultats comparés aux modèles avec peu de paramètres (Merritt et al., 2003; Perrin et al., 2009).

2.2. Échelle spatiale et temporelle des modèles

Les modèles sont développés suivant les échelles temporelles ou spatiales pour permettre une large gamme d'applications.

Sur la base de l'échelle spatiale les modèles peuvent être soit à l'échelle de champ (parcelle), soit à l'échelle du bassin versant. Pour les modèles champs (quelques mètres carrés à approximativement 10 km²) l'état de surface, le type de sol, la pente et le profil pédologiques sont homogènes, la pratique agricole est unique et la pluie est uniformément répartie dans l'espace (Pandey et al., 2016). Quant aux modèles bassins versants les conditions météorologiques varient généralement dans le bassin. Ces modèles divisent le bassin versant en parties homogènes plus petites car ils utilisent des topographies, des géologies, des types de sols et des états de surfaces hétérogènes.

L'échelle spatiale joue un rôle important dans les processus de ruissellement dans un bassin. Les modèles peuvent être globaux, semi-distribués et distribués en fonction de l'impact des paramètres spatiaux sur le ruissellement. Ainsi, le modèle global ne prend pas en compte la variabilité spatiale des processus et les conditions aux limites. La variabilité spatiale des processus et les résultats sont reflétés par les modèles distribués (Zhang et al., 1996). Entre les modèles globaux et distribués, il existe les modèles semi-distribués qui divisent le bassin versant en sous-bassins de caractéristiques hydrologiques homogènes (Schumann, 1993) en utilisant les unités de réponse hydrologique (HRUs).

Sur la base de l'échelle temporelle les modèles sont soit continus, soit discontinus. Les modèles continus permettent de suivre l'évolution des paramètres de sortie sur une longue période, alors que les modèles discontinus simulent la réponse du bassin au cours de l'événement pluviométrique ce qui permet l'appréciation de la réponse hydrologique aux événements de fortes intensités et de courtes durées.

2.3. Fonctions utilisées dans les différents modèles

La modélisation de la transformation d'une pluie en débit fait intervenir deux types de fonctions (Rakotoarisoa et al., 2012). La fonction de production et la fonction de transfert. La fonction de production partage les précipitations entre le ruissellement et l'infiltration en fonction de l'occupation du sol et de la pédologie. La fonction de transfert, elle permet d'établir le régime de transport du ruissellement vers l'exutoire en tenant compte de la topographie.

La plupart des modèles utilisés à l'échelle de la parcelle agricole sont globaux et basés sur les formulations analytiques du processus d'infiltration qui redistribuent la pluie entre le ruissellement et l'infiltration. Divers auteurs ont tenté de fournir une formulation analytique, de nature physico empirique du processus d'infiltration et donc du ruissellement (Green et Ampt, 1911; Richards, 1931; Kostiakov, 1932; Horton, 1933; SCS, 1972; Philip, 1985). Dans notre contexte, le but de la modélisation à l'échelle parcellaire est de caractériser l'impact des pratiques agricoles sur le ruissellement comme certains auteurs ont déjà abordé la question (Chahinian et al., 2006; Laloy et Bielders, 2008; Charlier et al., 2009). Des méthodes numériques basées sur la résolution des équations hydrodynamiques ont été utilisées pour simuler le ruissellement bidimensionnel en tenant compte de la microtopographie et de la croûte de surface (Fiedler and Ramirez, 2000; Esteves et al., 2000; Mügler et al., 2011; Delestre et al., 2014). Le ruissellement est représenté par les équations de Saint-Venant qui combine l'équation de conservation de la matière et la conservation de quantité de mouvement. Ces équations numériques de simulation du ruissellement des eaux peu profondes ne sont pas très utilisées à cause des calculs numériques intensifs. Ces équations sont utilisées de façon limitée dans certains modèles tels que Fullswof (Delestre et al., 2014), HYDRUS (Šimůnek et al., 2008). Le **Tableau 4-1** montre certains des algorithmes couramment utilisés par les modèles de simulation hydrologique.

Peu d'approches de modélisation prennent en compte les flux d'évaporation de l'eau collectée à la surface du sol et de l'évapotranspiration générée par l'ensemble plante-sol. Ces modèles n'intègrent pas de potentiels de stockage en eau du sol limitant ainsi la mémorisation du stock d'eau entre deux évènements pluvieux.

Tableau 4-1: Fonctions utilisées dans les différents modèles

Nom	Algorithme	Limites
Green and Ampt (Green and Ampt, 1911)	$I_C^n = K_s \left(1 + \frac{h_f - h_{sur}^n}{Z_f^n} \right)$ $Z_f^n = \frac{V_{inf}^n}{\theta_s - \theta_i}$	Exigence en nombre et difficulté de détermination des paramètres d'entrées Charge de pression antécédente à la pluie difficile à déterminer rendant ainsi impossible la simulation en continue
Horton (Horton, 1933)	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \times e^{-\gamma t}$	Difficulté de déterminer l'infiltrabilité initiale et finale avant et après la pluie d'où la difficulté d'une simulation continue
SCS-CN (SCS, 1972)	$R = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$ $P = I_a + F + R$	Non-prise en compte de l'intensité de pluie Modèle évènementiel Processus de surface limité à la collecte de l'eau
Méthode basée sur le temps de concentration à l'échelle parcellaire : Les isochrones (Zhao and Wu, 2015)	$v_i = v_m \frac{FAi}{FAM}$ $T = t_p + T_i = D/I + \sum_{j=1}^n t_i(j)$ $Q(t) = \sum_{\Delta t=0}^t A_{\Delta t} I$	Intensité de pluie constante Non prise en compte de l'infiltration et de l'évapotranspiration La surface contributive au ruissellement évolue de façon constante
Equations d'onde dynamique (Delestre et al., 2014)	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial u}{\partial t} + U \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_o + S_f)$	Exigence en paramètres d'entrées Intensité de la pluie et l'hydrogramme de ruissellement doivent être connus Temps de calcul très important
Notations utilisées	<p>I_C^n : Capacité d'infiltration de Green & Ampt ; $-K_s$: la conductivité hydraulique à saturation ; h_{sur}^n : épaisseur de la lame d'eau en surface ; h_f : la pression de charge au front d'humectation ; Z_f^n : la profondeur au front d'humectation V_f^n : volume d'eau infiltrée ; θ_i la teneur en eau initiale ; θ_s : la teneur en eau saturée</p> <p>$i(t)$: Capacité d'infiltration au temps t de la fonction de Horton ; i_0: infiltrabilité initiale ; i_f: infiltrabilité finale ; t: temps écoulé depuis le début de l'adverse ; γ: constante empirique fonction de la nature du sol</p> <p>R le ruissellement direct de la fonction SCS-CN ; P : la précipitation totales; I_a : l'abstraction initiale ; F : l'infiltration cumulative à l'exclusion de I_a ; et S : la rétention maximale potentielle</p> <p>Q(t) le ruissellement de la fonction des isochrones ; $A_{\Delta t}$ la surface contributive pour chaque temps de concentration Δt durant la pluie ; I est l'intensité de la pluie ; T est le temps de consentration ; t_p est le temps de remplissage des dépressions ; Ti est le temps accumulé par l'eau de pluie pour passer d'une maille à l'exutoire de la parcelle ; D est la profondeur de la dépression ; $t_i(j)$ est le temps de trajet à travers la cellule j ; v_i est la vitesse d'écoulement dans la cellule i ; v_m est la vitesse moyenne d'écoulement sur toutes les mailles ; FAi est le cumul de la surface amont ayant contribué à l'écoulement et FAM est la moyenne de la surface d'écoulement accumulée de toutes les cellules</p> <p>h est la lame d'eau ; q le débit par unité de largeur ; u la vitesse de l'eau ; g l'accélération due à la gravité ; S_o et S_f sont les termes de variation de la topographie et de frottement</p>	

La plupart des modèles parcellaires globaux (les plus simples) sont généralement discontinus et n'intègre pas les processus de redistribution de la pluie par les végétaux. Ils sont donc incapables de reproduire la redistribution temporelle des différents flux d'eau. Aussi, ces modèles semblent moins adaptés au contexte des pratiques agricoles où la mise en culture induit

une modification profonde des processus de ruissellement à cause de leurs capacités à collecter et à stocker l'eau dans le sol. Dans notre contexte d'étude, le choix du modèle est fonction des processus à simuler et des spécificités des pratiques agricoles. Il s'agira de simuler le stockage continu de l'eau dans le sol en tenant compte de la capacité de collecte et de redistribution des eaux de pluie par les pratiques culturales. À notre connaissance, il existe peu d'approches de modélisation en milieu cultivé qui pourrait guider notre choix. Ainsi, une approche qui tient compte des spécificités des techniques agricoles et de la redistribution des eaux de pluie a été développée pour simuler le stockage de l'eau dans le sol dans ce contexte de variabilité pluviométrique. Ce modèle permettra d'appréhender les performances hydrologiques des techniques et de proposer des techniques plus efficaces en termes hydrologiques.

3. Matériels et méthodes

3.1. Choix d'un modèle hydrologique

Des modèles de ruissellement bidimensionnels (basés sur les équations d'eau peu profonde) ont simulé avec succès la dynamique de ruissellement observée sur des surfaces à l'échelle de la parcelle (Esteves et al., 2000; Fiedler and Ramirez, 2000; Mügler et al., 2011). Cependant, ces types de modèle à base physique et distribué nécessitent de calculs importants pour les géométries complexes, ce qui les rend peu pratiques pour des simulations continues. De plus, ils manquent d'une caractérisation précise de la capacité de stockage en eau du sol et sont donc difficiles à combiner avec les modèles d'évapotranspiration. Parmi les modèles hydrologiques présents dans la littérature, le modèle SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve number) est choisi dans cette étude car il permet de simuler le ruissellement et l'infiltration sur une parcelle agricole.

3.2. Description du modèle SCS-CN

L'agence du Service National de Conservation des Ressources (NRCS) de l'USDA, anciennement connue sous le nom de Service de Conservation des Sols (SCS), a développé l'approche SCS-CN (Mishra et Singh, 2003) largement utilisée au cours des dernières décennies en contexte sahélien (Peugeot et al., 1997; Gerbaux et al., 2009; Assefa et al., 2016).

Le curve number est un modèle conceptuel qui repose sur une caractérisation empirique de la relation pluie-débit permettant de calculer le ruissellement à la surface (Mishra and Singh, 2003). Ce modèle est basé sur l'équation du bilan hydrique et deux hypothèses fondamentales. La première hypothèse admet que le rapport entre le ruissellement direct (R) et la précipitation disponible (P-I_a) est égal au rapport entre l'infiltration réelle (F) et la capacité maximale de stockage (S). La seconde hypothèse relie l'abstraction initiale (I_a) à la capacité maximale de stockage (Mishra and Singh, 2003; Soulis and Valiantzas, 2012). Ainsi, on a les égalités suivantes :

L'équation du bilan d'eau (**Equation 14**)

$$P = R + I_a + F \quad (14)$$

Hypothèse de proportionnalité (**Equation 15**)

$$\frac{R}{P-I_a} = \frac{F}{S_{max}} \quad (15)$$

Relation entre l'abstraction initiale et la capacité maximale de stockage (**Equation 16**)

$$I_a = \lambda S_{max} \quad (16)$$

Avec P [L] la précipitation totale; I_a [L] l'abstraction initiale; F [L] l'infiltration cumulative; R [L] le ruissellement direct; et S_{max} [L] le potentiel maximale de rétention.

La combinaison des **équations 14 et 15** nous donne l'équation de base de la méthode (**Equation 17**)

$$R = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S_{max}} \quad (17)$$

Le potentiel maximal de rétention S et les caractéristiques du bassin versant sont reliés par le paramètre connu sous le nom de « curve number », indiqué par **l'équation 18** :

$$S = \frac{25400-254CN}{CN} \quad (18)$$

Le CN est fonction de l'hydrodynamisme du sol, des pratiques d'aménagement du sol et l'antériorité de l'humidité du sol. Sa valeur varie de 0 à 100. Plus le CN est élevé, plus le

ruissellement est important. Les sols très imperméables limitent l'infiltration, mais ne permettent pas de stocker des quantités importantes d'eau. Les sols sont classés selon des catégories décrites aux Etats-Unis par le service de conservation du sol américain en fonction de leur infiltrabilité. Des abaques détaillent les valeurs de ce paramètre (Neitsch et al., 2005).

Cette méthode relativement simple est intégrée dans de nombreux modèles hydrologiques et d'érosion (Pandey et al., 2016) tels que Soil and Water Assessment Tools (**SWAT**, Arnold et al., 1995), **OPUS** (Smith, 1992), Agricultural non-point source pollution model (**AGNPS**, LIU et al., 2008). La méthode a été utilisée à l'échelle de la parcelle pour améliorer la prédiction du ruissellement en intégrant la durée de l'averse et l'humidité antécédente (Shi et al., 2017). Le ratio de l'abstraction initiale λ a également fait cas d'étude à la parcelle pour améliorer les performances du modèle à simuler le ruissellement (Woodward et al., 2003).

3.3. Modification du modèle SCS-CN pour la simulation continue du bilan hydrologique du sol

Le modèle du « curve number » (SCS-CN : Soil Conservation Service-Curve number) a été modifié et adapté pour répondre à l'objectif de ce chapitre qui est d'étudier l'aptitude des techniques agricoles à stocker l'eau dans le sol dans un contexte de variabilité climatique. L'approche SCS-CN a été initialement développée pour la modélisation événementielle et ne permet pas la prise en compte explicite de conditions initiales spécifiques pour des événements de pluie différents. Ceci limite la pertinence d'un tel modèle dans un contexte caractérisé par une grande variabilité des précipitations, car la teneur initiale en eau du sol peut varier largement en fonction des conditions climatiques rencontrées avant un événement pluviométrique. Une autre contrainte est que la méthode est basée sur un partage entre infiltration et ruissellement qui dépend essentiellement de la capacité d'infiltration du type de sol et d'un effet de saturation de l'infiltration au cours d'un événement de pluie, mais elle est limitée au niveau de la prise en compte de processus de surface à une simple perte retranchée au début de chaque événement qui représente la part de précipitation qui ne participe ni au ruissellement, ni à l'infiltration. Dans la présente section, nous proposons deux modifications majeures à la méthode originale SCS-CN afin de répondre aux contraintes spécifiques de notre étude de cas.

Tout d'abord, le stock d'eau antécédent du sol est le facteur clé dans la prédiction du ruissellement à partir d'un modèle pluie-débit. Par conséquent, comme nous visons à simuler de façon continue les flux hydrologiques pendant la saison des pluies, il est souhaitable de développer une formulation pour estimer le stock d'eau en début de chaque événement pluvieux. Le modèle doit permettre une actualisation et une mémorisation du stock d'eau entre deux événements pluvieux. Son état par rapport à la capacité maximale de stockage peut ainsi être utilisé pour déterminer la partition entre le ruissellement et l'infiltration lorsqu'un événement de précipitation commence. Cela peut être fait à l'aide d'un bilan hydrologique du sol (Bui et al., 2013; Giakoumakis et al., 2015; Shi et al., 2017).

Une autre modification a été apportée pour tenir compte des processus de collecte et de rétention de surface plus complexes induits par la disposition des techniques de collecte de l'eau. Même, si dans la méthode originale du SCS-CN, l'eau interceptée par les dépressions est considérée comme perte, cela ne serait être réaliste dans notre cas d'étude. En effet, l'eau stockée dans les dépressions est partiellement évaporée et infiltrée sur une période qui pourrait persister même après l'arrêt des pluies, en fonction de la dynamique d'évaporation et de la capacité d'infiltration du sol. Cette infiltration d'eau des dépressions doit également être prise en compte dans le stockage de l'eau du sol. Un schéma du modèle modifié est présenté à la **Figure 4-1**.

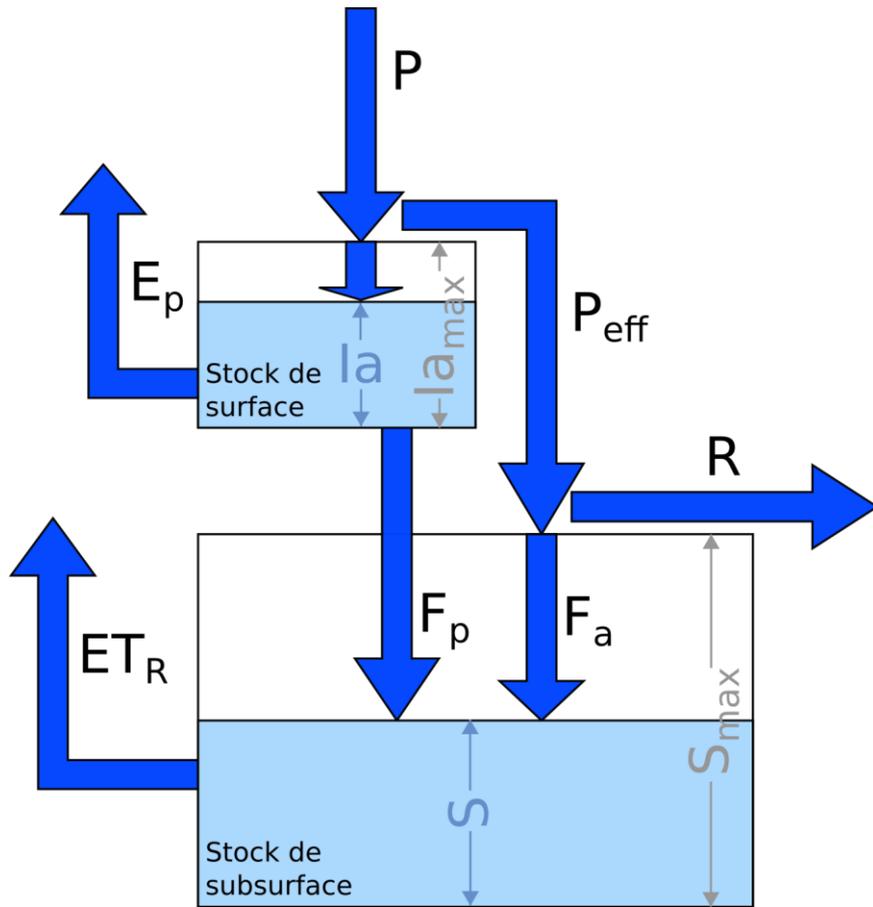


Figure 4-1: Représentation schématique des processus dans le modèle conceptuel SCS-CN modifié

Lorsque la précipitation commence, l'eau remplit tout d'abord complètement le stockage de surface $I_a = I_{a,max}$ avant que la précipitation effective P_{eff} ne soit générée. P_{eff} est ensuite partitionné entre la production de ruissellement R (**Equation 19**) et l'infiltration directe F_a (**Equation 20**) en fonction de l'état actuel du stock d'eau du sol :

$$R = \frac{P_{eff}^2}{P_{eff} + (S_{max} - S)} \quad (19)$$

$$F_a = P_{eff} - R \quad (20)$$

Avec S_{max} la capacité de stockage maximale et S le stockage actuel, exprimé en mm. Comme le modèle fonctionne à l'échelle journalière, tous les autres termes sont exprimés en mm/j. Notez que l'**équation 17** découle de la relation empirique entre l'infiltration cumulative sur la capacité de stockage du sol et l'écoulement cumulé réel sur l'écoulement maximal potentiel ($P - I_a$) qui constitue la base de la méthode SCS-CN. Ainsi, le ruissellement est recalculé à chaque pas de

temps en utilisant la valeur mise à jour du stockage ($S_{\max}-S$), permettant ainsi de faire fonctionner le modèle en mode continu (Bui et al., 2013). Le stockage est donc recalculé à chaque pas de temps pour tenir compte des flux entrants (à savoir infiltration directe F_a , et infiltration des dépressions F_p) et du flux sortant (à savoir l'évapotranspiration réelle ET_r). L'infiltration de l'eau contenue dans les dépressions (**Equation 21**) est une constante de vidange supposée être proche de la conductivité hydraulique à saturation du sol jusqu'à ce que le stockage de surface du sol soit vide :

$$F_p = K_{sat} \times A_p, I_a > 0 \quad (21)$$

Avec F_p l'infiltration au niveau des dépressions en mm / j, K_{sat} la constante d'infiltration proche de la saturation en mm / j, A_p la fraction de la surface totale de la parcelle que représentent les dépressions, et I_a l'état actuel de stockage en surface en mm. Simultanément à l'infiltration des dépressions, l'évaporation de surface de l'eau libre E_p (**Equation 22**) tarit également l'eau collectée en surface. Les taux d'évaporation de surface sont pris à partir des mesures du bac d'évaporation :

$$E_p = e \times A_p \quad (22)$$

Avec E_p l'évaporation des dépressions et (e) le taux d'évaporation mesuré par le bac d'évaporation en mm/j.

Ensuite, l'évapotranspiration effective ET_r prélève l'eau du stockage du sol S , et contribue ainsi à restaurer la capacité de stockage S_{\max} lors des périodes inter-événements.

Nous utilisons la méthode FAO-56 de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) avec les données de la station météorologique pour calculer l'évapotranspiration de référence ET_0 . L'évapotranspiration culturale (ET_c) est calculée par l'**équation 23** et tient compte des besoins en eau spécifiques aux cultures qui dépendent du stade de développement de la plante. La disposition des différentes techniques de collecte de l'eau modifie considérablement la densité effective de la plante sur la parcelle, car les espaces entre les creux sont laissés non plantés. Par conséquent, l'équation de l'évapotranspiration culturale se lit comme suit :

$$ET_c = K_A \times K_c \times ET_0 \quad (23)$$

Avec ET_c et ET_0 en mm/j, et K_c le coefficient cultural sans unité pour le mil, et K_A le facteur de correction de la densité des plants sans unité (**Tableau 4-2**). Le modèle suppose que l'évapotranspiration réelle (ET_r) fonctionne à son taux maximal d' ET_c 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 (**Equation 24**) :

$$\begin{aligned}
 ET_r &= ET_c \quad \text{si } S \geq ET_c \\
 ET_r &= S \quad \text{si } 0 \leq S < ET_c
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Le stockage en surface et le stockage de subsurface ont été considérés comme complètement vides avant le début de la saison des pluies, car une longue période de sécheresse précède généralement le début de la saison. Notez que la condition de $S = 0$ n'implique pas nécessairement un sol complètement sec physiquement, mais plutôt un état où l'eau ne peut être retirée par évapotranspiration (correspondant au point de flétrissement en termes de science du sol) et par conséquent ne subit pas de diminution supplémentaire de la teneur en eau du sol dans des conditions naturelles. Compte tenu des exigences modérées de la méthode SCS-CN en termes de paramètres et de l'ensemble des mesures expérimentales réalisées, l'étalonnage est relativement simple et ne nécessite pas l'utilisation d'un algorithme d'optimisation. Seul le volume de stockage de surface maximum $I_{a,\max}$ et la capacité maximale de stockage du sol S_{\max} doivent être définis pour chaque pratique agricole. Comme $I_{a,\max}$ représente le seuil au-dessus duquel le ruissellement est généré, autrement dit le volume de pluie minimum pour produire le ruissellement (si I_a est nul avant le début de la pluie), il peut être directement évalué à partir des données expérimentales. Nous avons également montré que les différentes techniques agricoles peuvent affecter les fonctions de stockage du sol (propriétés hydrauliques de surface du sol et propriétés hydrodynamiques du sol) donc la capacité de stockage maximale S_{\max} peut être différente pour chaque technique. Le S_{\max} a été calibré pour chaque technique, afin d'obtenir le meilleur ajustement entre les ruissellements observés et simulés, ainsi que pour améliorer le coefficient de détermination. Les autres paramètres constants utilisés dans le modèle sont résumés dans le **Tableau 4-2**.

Tableau 4-2: Description des paramètres indépendants de l'état et de leurs valeurs pour chaque pratique agricole.

Paramètres	Description	Témoin	Cordon-pierreux	Zaï	Demi-lune
K _{sat}	Conductivité hydraulique à saturation (cm/h)	3.4	3.8	6.4	1.0
P _d	Densité des plants (plantes/ha)	24200	24200	16350	12600
K _A	Facteur de correction de la densité des plants (%)	1.0	1.0	0.7	0.5
A _P	Fraction de la surface totale de la parcelle que représentent les dépressions (%)	1.0	1.0	0.2	0.3
K _c	Phase initiale (0-14 jours)			0.30	
	Phase de développement (15-39 jours)			0.65 ^a	
	Phase de mi- saison (40-79 jours)			1.00	
	Arrière-saison (80-104 jours)			0.65 ^b	
	Fin de saison (plus de 105 jours)			0.30	

^a Une augmentation linéaire du K_c est considérée entre le jour 15 et le jour 39.

^b Une diminution linéaire du K_c est considérée entre le jour 80 et le jour 104 (Allen et al., 1998).

3.4. Evaluation des performances agronomiques des pratiques agricoles

Dans le but de lier la production agricole au stockage en eau du sol, et d'appréhender les effets des techniques sur la production agricole, les rendements grains ont été évalués pour chaque technique agricole à la fin de chaque campagne. Les rendements ont été déterminés en récoltant neuf (9) plants par parcelle. Les plantes ont été récoltées à l'intérieur des parcelles pour éviter les effets de bordure. Le poids moyen des grains par parcelle a été déterminé et rapporté à l'hectare car connaissant le nombre de plants à l'hectare.

3.5. Calage et validation du modèle hydrologique

Le modèle SCS-CN modifié a été calibré avec les données de ruissellement observées de 2016 en utilisant les paramètres présentés au **Tableau 4-2**. Les données de précipitation, d'évaporation, d'infiltration, et d'évapotranspiration issues des observations de 2016 sont

utilisées en entrée du modèle. Les deux principaux paramètres spécifiques à la technique pour le SCS-CN modifié sont l'abstraction initiale $I_{a,max}$ et la capacité maximale de stockage S_{max} . Comme le modèle suppose le remplissage du stock de surface, $I_{a,max}$ peut être défini comme la pluie limite de ruissellement (Plr) qui correspond à la quantité de pluie tombée nécessaire avant que ne débute le ruissellement sur chaque technique agricole et peut être déduite directement des observations (Voir chapitre 3, section 3.1.2). Comme nos observations suggèrent que les pratiques culturales peuvent affecter les propriétés hydrauliques de surface du sol et par conséquent augmenter l'infiltration et le stockage de l'eau du sol, le S_{max} a été calibré pour chaque pratique agricole. Grâce à la simplicité de sa structure et son faible nombre de paramètres, SCS-CN modifié a été implémenté dans un tableur Excel. Les valeurs S_{max} pour chaque pratique agricole sont optimisées par itération. Les données de ruissellement et de climat observées des campagnes 2015 et 2017 ont été utilisées pour la validation du modèle hydrologique en utilisant les mêmes paramètres qu'en 2016.

3.6. Évaluation des performances du modèle

Le coefficient de détermination noté R^2 largement utilisé en hydrologie est retenue pour l'évaluation de la qualité du modèle SCS-CN modifié (Moriassi et al., 2007; Foglia et al., 2009). Le coefficient de détermination R^2 est défini comme la valeur carrée du coefficient de corrélation de Pearson. R^2 (**Equation 25**) représente la proportion de variances dans les données mesurées expliquées par le modèle. C'est un indicateur qui permet d'évaluer la performance du modèle en indiquant la force de liaison entre les valeurs simulées et observées (Foglia et al., 2009). Cela va de 0 à 1, avec les valeurs proches de 1 indiquant un bon accord, et typiquement, des valeurs plus grandes que 0.5 sont considérées acceptables dans les simulations hydrologiques.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{obs} - R_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{obs} - \overline{R_{obs}})^2} \in [0, 1] \quad (25)$$

Avec n le nombre de mesure, R_{obs} : valeur mesurée ; $\overline{R_{obs}}$: moyenne des valeurs mesurées ; R_{sim} valeur simulée.

4. Résultats et discussions

4.1. Performance du modèle hydrologique à simuler le ruissellement

Le modèle a été calibré avec les données de ruissellement et de climat observées de 2016. La saison 2016 aillait fournie que peu de données, nous avons validé le modèle hydrologique avec les données de ruissellement observées lors des campagnes 2015 et 2017. Les deux principaux paramètres spécifiques pour le SCS-CN modifié sont la capacité maximale de stockage de surface $I_{a,max}$ et la capacité maximale de stockage du sol S_{max} . Nous avons utilisé 7, 10, 20 et 48 mm respectivement pour les parcelles témoin, cordon pierreux, zai et demi-lune (voir chapitre 3, section 3.1.2). Les valeurs calibrées pour S_{max} sont de 35, 40 et 70 mm respectivement pour le témoin, le cordon pierreux et le zai. Comme le ruissellement est presque inexistant sur les parcelles de demi-lune, l'étalonnage et la validation n'ont pas été possibles et la valeur de S_{max} de 70 mm est retenue en référence de la capacité maximum de stockage.

Les **Figures 4-2, 4-3 et 4-4** montrent les séries temporaires de pluie et les réponses de ruissellement observées et simulées pour chaque pratique agricole durant les périodes 2015, 2016 et 2017. Nous observons que l'occurrence des événements de ruissellement et leur importance sont reproduites de façon adéquate, et la variabilité entre les pratiques est étroitement appréhendée par le modèle. Les ruissellements de 2016 sont bien reproduits sur toutes les parcelles (R^2 compris entre 0.84 et 0.95). Les simulations de 2017 se comportent également bien, avec une bonne prévision du ruissellement pour les trois pratiques (R^2 compris entre 0.87 et 0.95). Les ruissellements simulés de 2015 sont aussi bien reproduits (R^2 compris entre 0.73 et 0.93) même si la saison a été beaucoup plus humide qu'en 2016 et 2017 avec des pluies importantes et de grands volumes de ruissellement (noter que les volumes importants de précipitations et de ruissellement de 2015 ont allongé l'axe des ordonnées de la **Figure 4-2** par rapport aux **Figures 4-3 et 4-4**). Rappelons qu'en 2015 du fait de l'installation tardive du dispositif, les mesures de ruissellements ont été disponibles qu'à partir du 10 août 2015. Ainsi, l'application du modèle aux données de pluies et de climats a permis de reproduire le ruissellement sur la période où le ruissellement n'a pas été mesuré.

Au regard de ces résultats présentés ci-dessus, nous pouvons dire que le modèle SCS-CN modifié simule très bien les volumes de ruissellement sur les différentes pratiques agricoles.

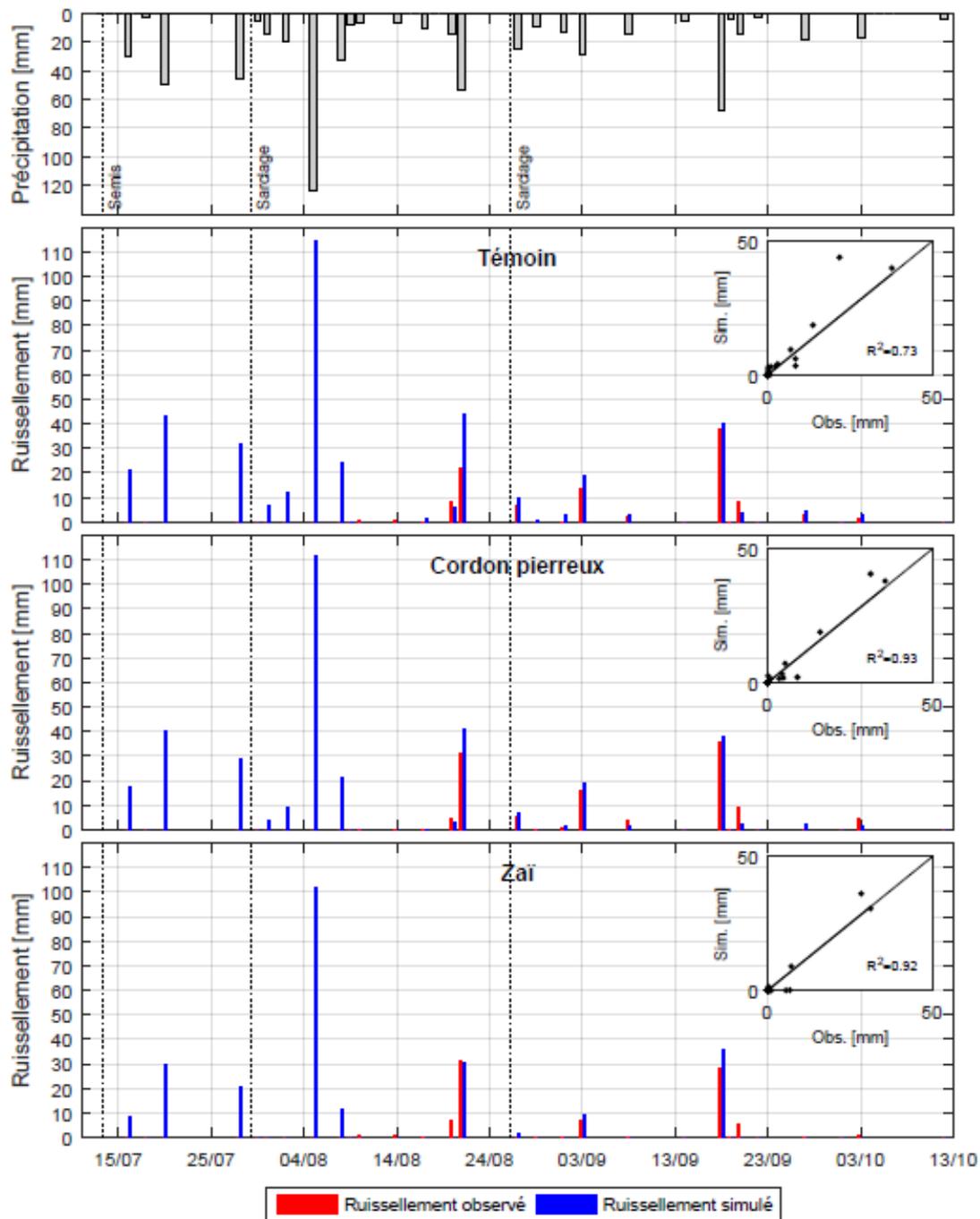


Figure 4-2: Ruissellement observé et simulé en 2015 (période de validation).
 Seule la parcelle témoin, cordon pierreux et le zai sont représentés. Le peu de données de ruissellement observé sur les demi-lunes n'a pas permis la simulation. Les histogrammes illustrent la correspondance entre le ruissellement observé et simulé et indiquent la qualité de l'ajustement.

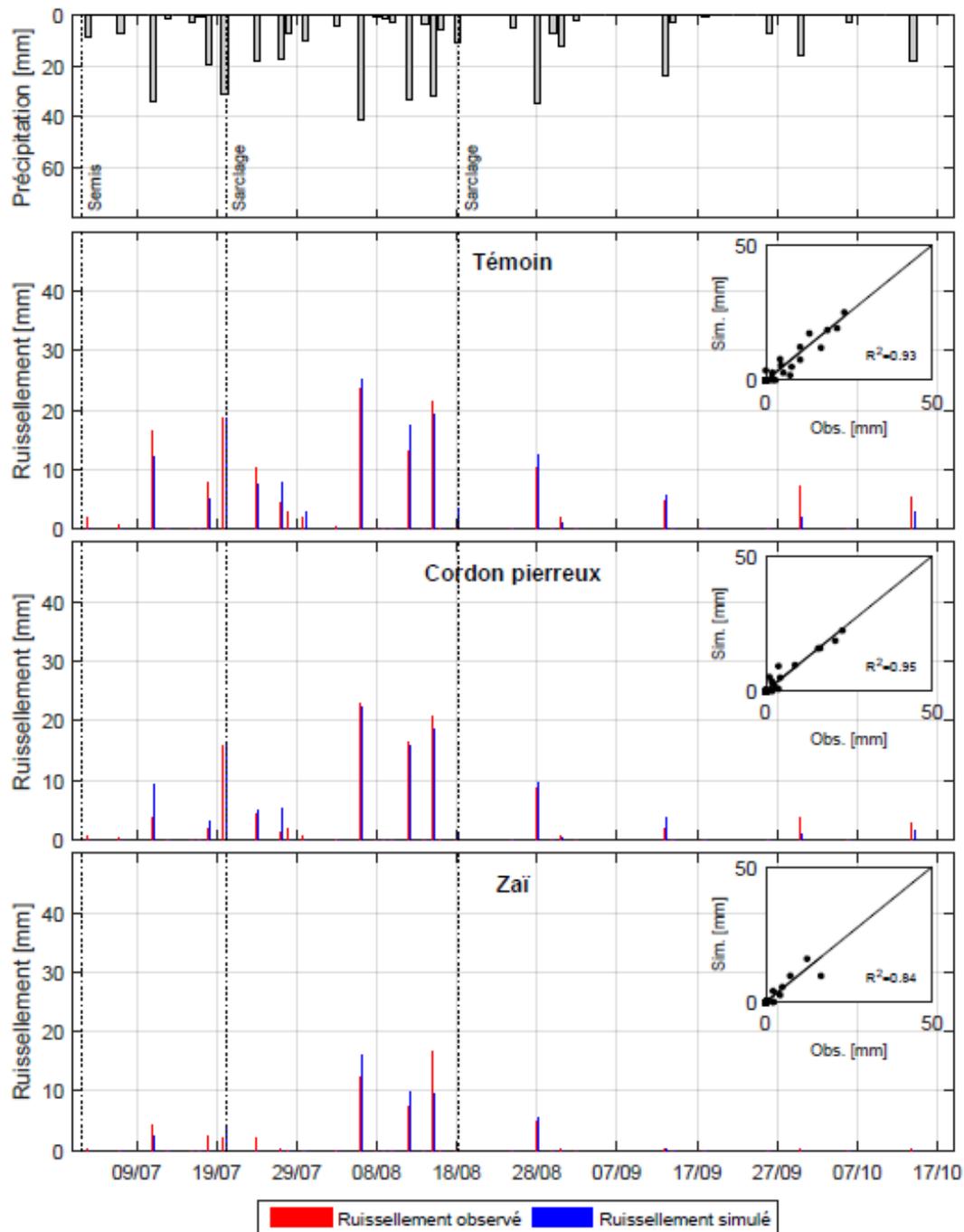


Figure 4-3: Ruissellement observé et simulé en 2016 (période de calibration).
 Seule la parcelle témoin, cordon pierreux et le zai sont représentés. La parcelle de demi-lune n'a pas générée de ruissellement significatif. Les histogrammes illustrent la correspondance entre le ruissellement observé et simulé et indiquent la qualité de l'ajustement

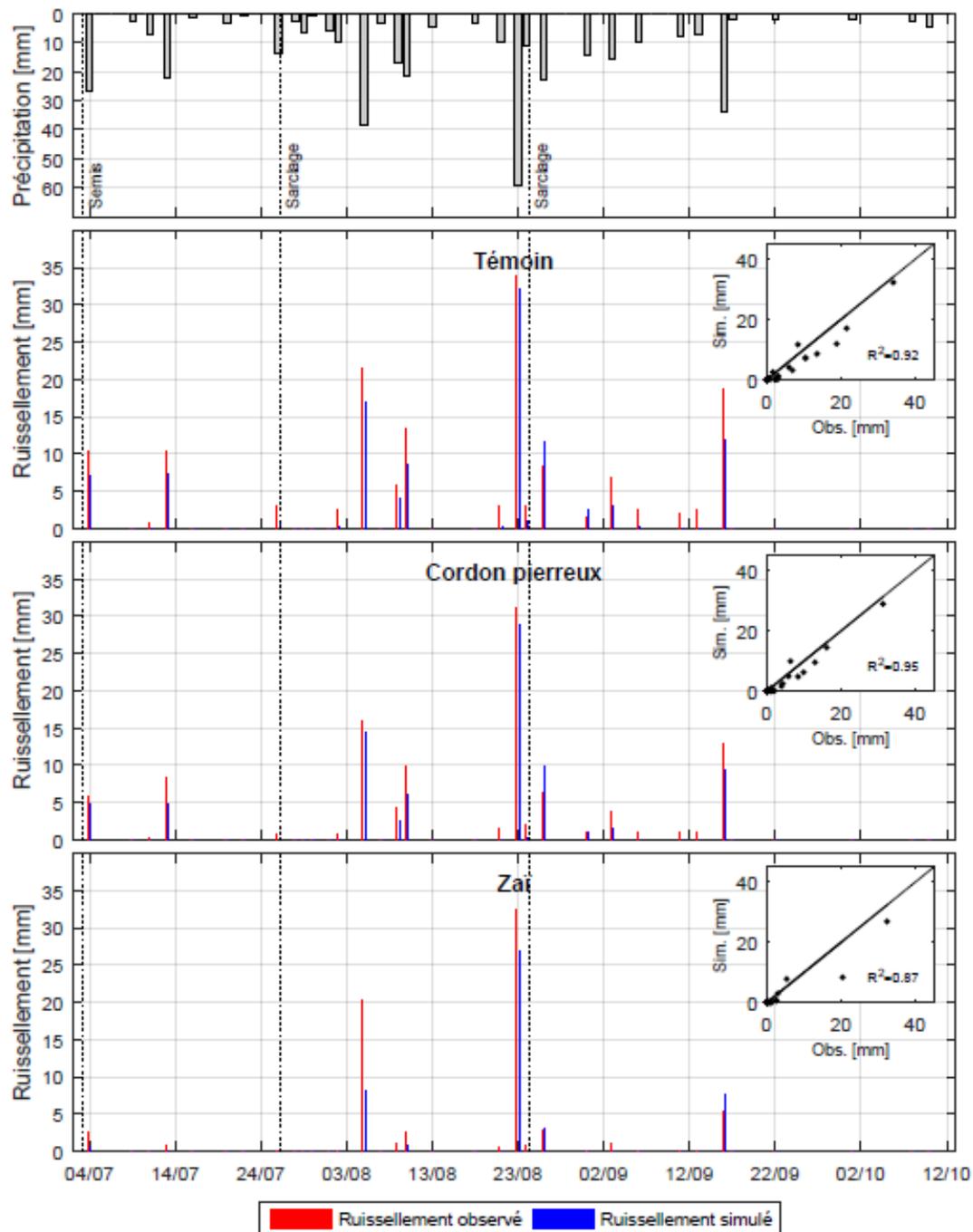


Figure 4-4: Ruissellement observé et simulé en 2017 (période de validation). Seule la parcelle témoin, cordon pierreux et le zai sont représentés. La parcelle de demi-lune n'a pas générée de ruissellement significatif. Les histogrammes illustrent la correspondance entre le ruissellement observé et simulé et indiquent la qualité de l'ajustement.

4.2. Analyse de sensibilité du modèle SCS-CN modifié

L'analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres qui influencent le plus sur les résultats du modèle (Refsgaard, 1997). Elle consiste à évaluer l'effet des paramètres sur les différentes sorties du modèle tant en termes de critère de performance qu'en termes de volumes écoulés (Huang and Liang, 2006; Iooss, 2011). Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'analyse de sensibilité du modèle par les paramètres de l'abstraction initiale et de la capacité maximale de stockage. L'abstraction initiale est considérée comme une perte dans la méthode originale du SCS-CN ne contribuant ni au ruissellement ni à l'infiltration dans le sol (Mishra et Singh, 2003). Cependant dans cette étude nous avons modifié la méthode pour redistribuer l'eau collectée en surface entre l'infiltration et l'évaporation. Aussi, le S_{max} a été calibré pour chaque pratique agricole pour tenir compte de la modification des propriétés hydraulique de surface du sol améliorant ainsi l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol. Il apparait donc nécessaire d'apprécier la sensibilité du modèle à reproduire le ruissellement par les paramètres Ia_{max} et S_{max} .

Le test a consisté à faire varier les valeurs du paramètre observé (Ia_{max}) et calibré (S_{max}) autour de plusieurs niveaux de surestimation (+20%, +40%, +60%, +80%, +100%) et de sous-estimation (-20%, -40%, -60%, -80%, -100%). La sensibilité du modèle au ruissellement est mesurée comme la variation relative du ruissellement moyen simulé par rapport au ruissellement moyen observé pour l'année 2016. Les résultats des tests de sensibilité pour la technique de zaï sont présentés à la **Figure 4-5**

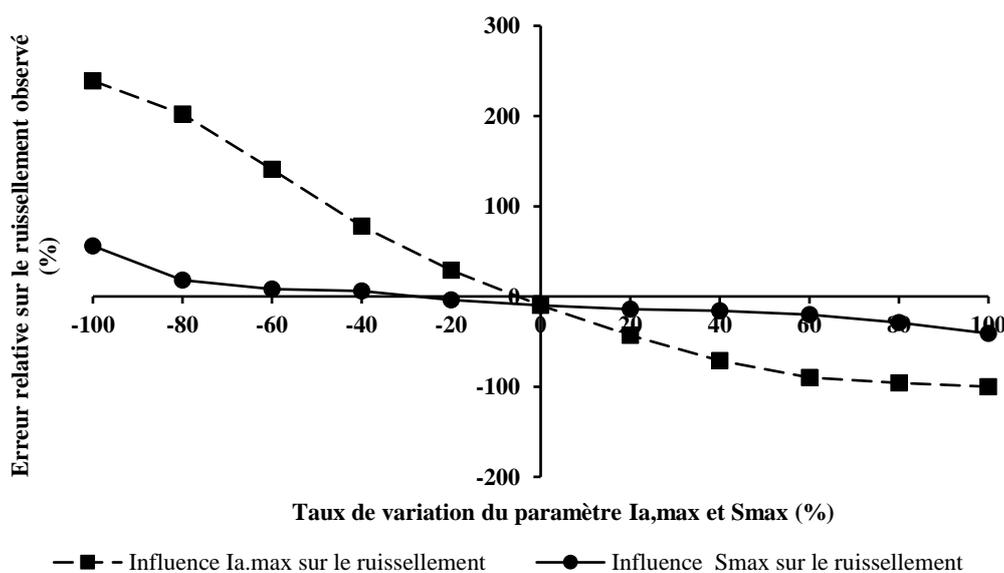


Figure 4-5: Test de sensibilité du modèle SCS-CN modifié au paramètres Ia_{max} et S_{max} pour l'année 2016 sur la technique de zaï

Le paramètre $I_{a,max}$ a une grande influence sur le ruissellement. Cette influence est plus forte pour $I_{a,max}$ nulle correspondant au cas où l'eau de ruissellement n'est pas collectée dans les dépressions pour ré infiltration dans le sol. Pour ce cas de figure, le ruissellement est surestimé à 240%. En effet, pour une diminution relative de $I_{a,max}$ entre 0 et -100% par rapport à la valeur observée (20 mm), le modèle surestime le ruissellement observé de 0 à 240%. Lorsque $I_{a,max}$ augmente relativement de 0 à 100%, le ruissellement observé est sous-estimé par le modèle de 0 à 100%. Autrement dit, le volume d'eau ruisselé est fortement corrélé à la quantité d'eau collectée dans les dépressions. Comparativement à $I_{a,max}$, la capacité maximale de stockage S_{max} influence moins le ruissellement, car pour une variation de -100 à 100% autour de la valeur de S_{max} , l'erreur relative sur le ruissellement varie de 56% à -41%, comparativement à $I_{a,max}$ ou l'erreur relative est estimée de 240% à -100%. Au regard de ces résultats, la prise en compte d'une redistribution de l'abstraction initiale dans notre cas d'étude où les dépressions induisent une collecte importante des eaux de surface (20 mm pour z_{ai}) est une condition réaliste pour la simulation hydrologique. L'eau collectée en surface et ré-infiltrée contribue à augmenter le stockage en eau du sol. Ainsi, la performance des techniques à réduire le ruissellement est principalement dû à leur capacité à collecter l'eau en surface et à l'infiltrer ensuite dans le sol.

La bonne performance du modèle à reproduire le ruissellement observé pendant la période de calibration et les deux périodes de validation peut être attribuée à sa capacité à saisir les différentes dynamiques des processus hydrologiques qui caractérisent chaque type de configuration des parcelles. En particulier, les modifications apportées à la méthode originale SCS-CN permettent de prendre en compte le stockage de l'eau en surface qui imite la rétention d'eau dans les dépressions. Ces grandes différences de capacités de rétention de surface sont responsables d'une grande partie de la variabilité du ruissellement observée. Il convient de rappeler que le paramètre de capacité de rétention de surface ($I_{a,max}$) n'est pas calibré, mais directement dérivé des données pluie-ruissellement. Les différentes capacités de rétention de surface du z_{ai} et de la demi-lune peuvent également être retrouvées en calculant la somme de chaque volume de dépression (en fonction de leur géométrie) rapportée à la surface de la parcelle. Ceci démontre l'interprétation physique et mesurable de ce paramètre qui montre la pertinence du modèle en tant qu'outil prédictif pour simuler l'effet de différentes géométries des pratiques agricoles. Le volume de stockage de surface peut être estimé tant que le volume des dépressions reste facilement mesurable. Il convient de souligner que le modèle suppose le remplissage complet du stockage en surface avant que l'infiltration directe et le ruissellement

soient déclenchés. L'importance et la dynamique de cette recharge en eau du sol sont déterminées par les taux d'évaporation et de perméabilité, ce qui permet potentiellement son extension sur plusieurs jours après la fin d'un épisode pluvieux dans certains cas (comme les demi-lunes). La prise en compte de ces processus permet de prévoir les conditions antérieures d'humidité avant chaque événement pluvieux. La prise en compte de ces processus contribue grandement à la performance du modèle à reproduire la variabilité des volumes de ruissellement.

Nous avons utilisé les conductivités hydrauliques à saturation mesurées sur chaque parcelle comme constante de vidange des dépressions dans le modèle. Ces valeurs semblent surestimées, car le modèle n'a pas montré la persistance de l'eau dans le stockage en surface pendant plus d'une journée, alors que les observations ont montré une stagnation occasionnelle de l'eau durant quatre jours dans les demi-lunes. Cependant, cette situation n'a pas d'effets notables sur les simulations présentées dans cette étude, car seules les demi-lunes dont les ruissellements ne sont pas significatifs ont démontré une rétention d'eau plus longue que la journée. Ainsi, pour toutes les autres techniques, une surestimation dans l'infiltration ne modifie pas la dynamique globale de l'eau de surface évaluée à l'échelle journalière, mais uniquement la partition des eaux de surface entre l'évaporation et l'infiltration, mais de façon négligeable. Pour les demi-lunes, la surestimation de l'infiltration peut conduire à une sous-estimation de la fraction d'évaporation au profit de l'infiltration, ce qui entraîne un stockage exagéré de l'eau du sol.

Les parcelles ont été initialement installées sur un sol de même nature. Les différentes valeurs de S_{\max} pour chaque parcelle suggèrent que les techniques induisent des modifications des propriétés hydrauliques du sol. Même si d'autres observations (Soulis et Valiantzas, 2012) confortent cette hypothèse, il convient de mentionner que l'importance du ruissellement est principalement contrôlée par la capacité d'accumulation de l'eau en surface (Cf. **Figure 4-5**).

4.3. Effets des techniques sur le stockage en eau du sol et l'atténuation des poches de sécheresse

Les **Figures 4-6, 4-7 et 4-8** montrent l'évolution du stock d'eau du sol simulé pour les trois années consécutives pour chaque pratique agricole. Dans l'ensemble, le stockage de l'eau du sol est le plus élevé pour les demi-lunes, suivi du zaï, du cordon pierreux et du témoin. Ce qui explique les différences de production de ruissellement observées précédemment. La réduction

du ruissellement se fait en grande partie au profit de l'augmentation du stock d'eau du sol, mais sa dynamique est également contrôlée par l'évapotranspiration réelle et la partition de l'eau stockée en surface entre l'évaporation et l'infiltration.

En 2015, nous observons que les pluies abondantes et bien réparties ont permis de maintenir le stock d'eau du sol durant la saison des pluies pour toutes les parcelles (**Figure 4-6**). Les besoins en eau des plantes ont donc été satisfaits en tout moment de la campagne. Ces résultats suggèrent que même sans l'aide d'une pratique agricole les exigences hydriques des plantes ont été satisfaites pour cette année 2015.

En 2016, la situation était différente, surtout au cours de la seconde moitié de la saison, lorsque les précipitations sont devenues rares (**Figure 4-7**). Les stocks d'eaux dans les parcelles témoins et cordon pierreux ont été asséchés quatre fois et trois fois respectivement, empêchant la satisfaction d'eau des cultures. Les trois dernières périodes de sécheresse survenues 65, 77 et 93 jours après le semis (JAS) ont pu être particulièrement néfastes pour les rendements, car elles ont duré plus d'une semaine sans pluie. En revanche, les parcelles zaï et demi-lune ont été capables de stocker suffisamment d'eau pour surmonter ces périodes de sécheresse et fournir suffisamment d'eau pour les plantes. Au total, les parcelles témoins et cordons pierreux ont été soumis à une sécheresse agronomique (correspondant à un stockage nul du sol) de 35 jours et 31 jours respectivement. Ces sécheresses ont entraîné un déficit hydrique de 117 mm et 105 mm respectivement sur la parcelle témoin et sur la parcelle de cordon pierreux.

En 2017, les premières précipitations ont été faibles et le stock d'eau n'a pas pu être entièrement renouvelé en début de saison comme en 2015 et 2016 (**Figure 4-8**). Par conséquent, le stock d'eau de toutes les pratiques était faible jusqu'à 30 - 40 JAS et parfois asséché pendant de courtes périodes dans la parcelle témoin. On remarque que 40 JAS quand le stockage en eau du sol a atteint sa valeur maximale pour toutes les techniques, on a enregistré que deux précipitations de moins de 5 mm pendant 11 jours. Cette période a conduit à un déficit hydrique d'un jour sur la parcelle témoin, après quoi les précipitations abondantes ont complètement reconstitué le stock d'eau de toutes les parcelles. L'occurrence des poches sèches en fin de saison (après 75 JAS), a provoqué l'assèchement total du témoin et du cordon pierreux pendant 16 jours et 14 jours respectivement jusqu'à la récolte. Les parcelles témoins et de cordon pierreux ont connu respectivement des poches sèches agronomiques de 25 et 17 jours entraînant un déficit hydrique saisonnier de 58 et 44 mm. En 2017, les techniques de zaï et de demi-lune ont de nouveau réussi à atténuer les effets des poches sèches en limitant les pertes dues au ruissellement de surface. La plus grande capacité de stockage combinée à la plus faible

demande d'évapotranspiration (la densité de la culture étant beaucoup plus faible sur ces parcelles) a permis de maintenir le stock d'eau plus longtemps sur les parcelles demi-lunes et de zai que sur les parcelles témoins et cordon pierreux.

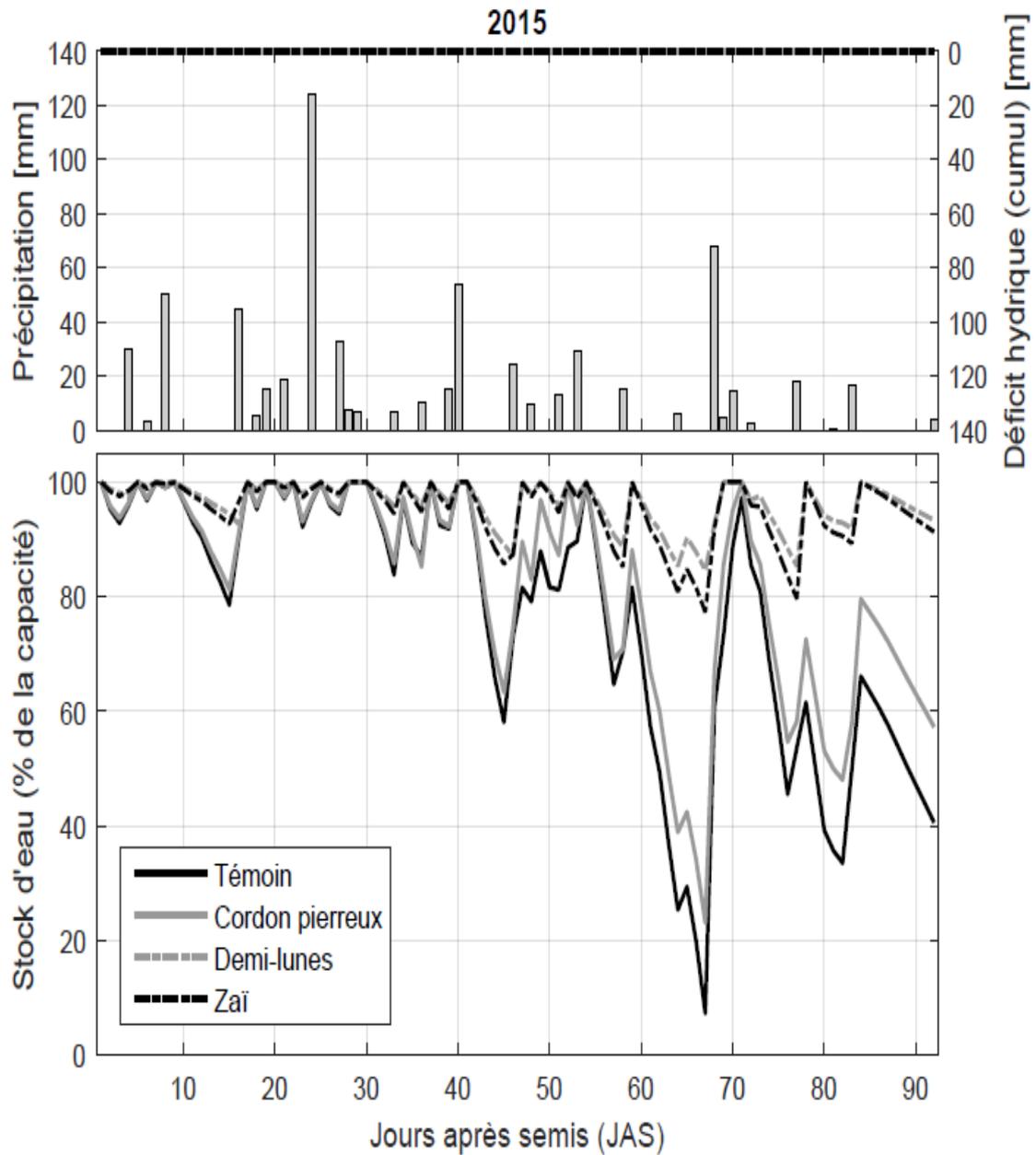


Figure 4-6: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2015 pour le témoin, le cordon pierreux, le zai et la demi-lune. Les courbes au-dessus des barres de précipitation représentent le déficit hydrique cumulé au niveau du mil, c'est-à-dire la différence entre l'évapotranspiration culturelle cumulative et l'évapotranspiration réelle cumulative.

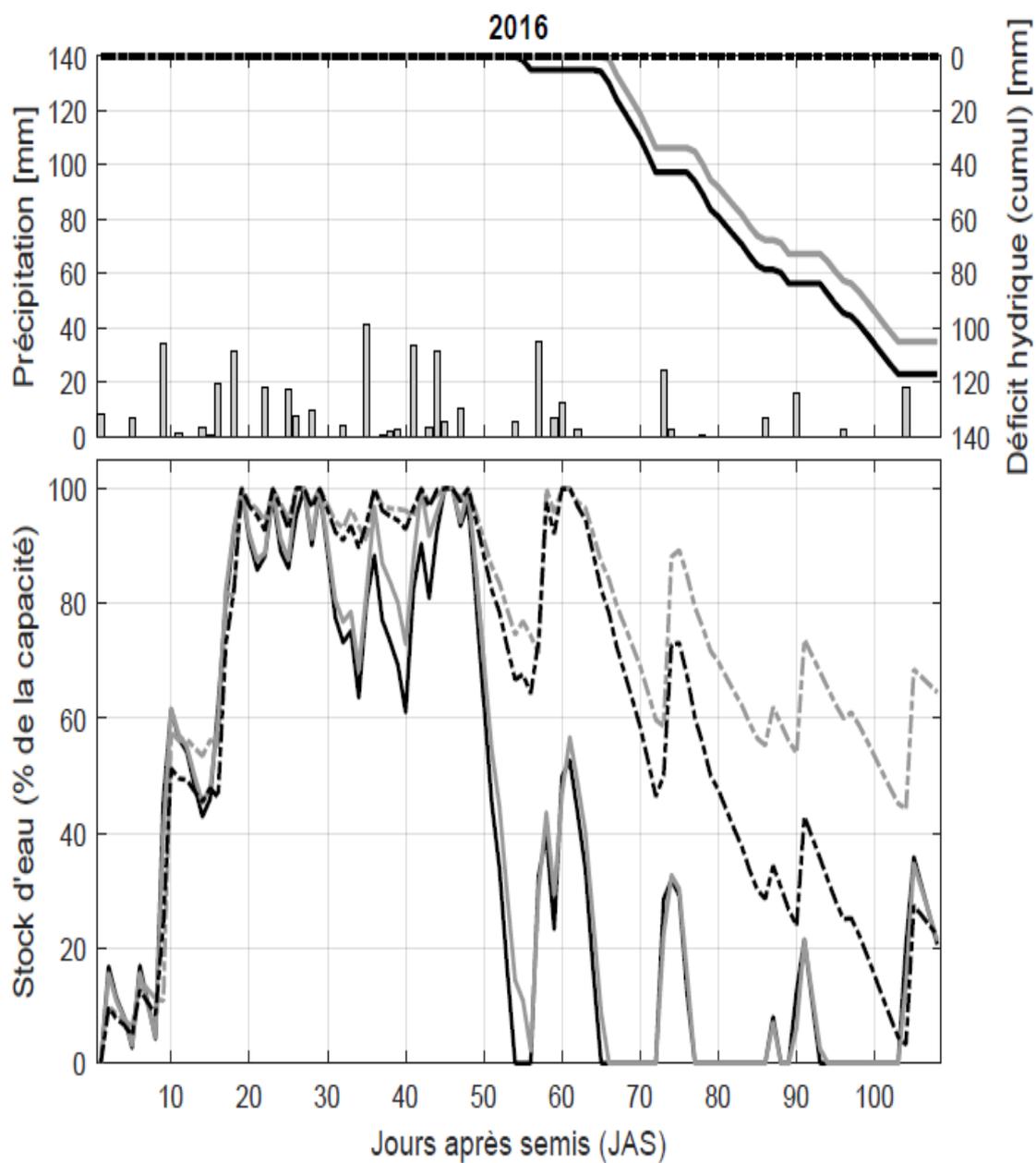


Figure 4-7: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2016 pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune. Les courbes au-dessus des barres de précipitation représentent le déficit hydrique cumulé au niveau du mil, c'est-à-dire la différence entre l'évapotranspiration culturelle cumulative et l'évapotranspiration réelle cumulative.

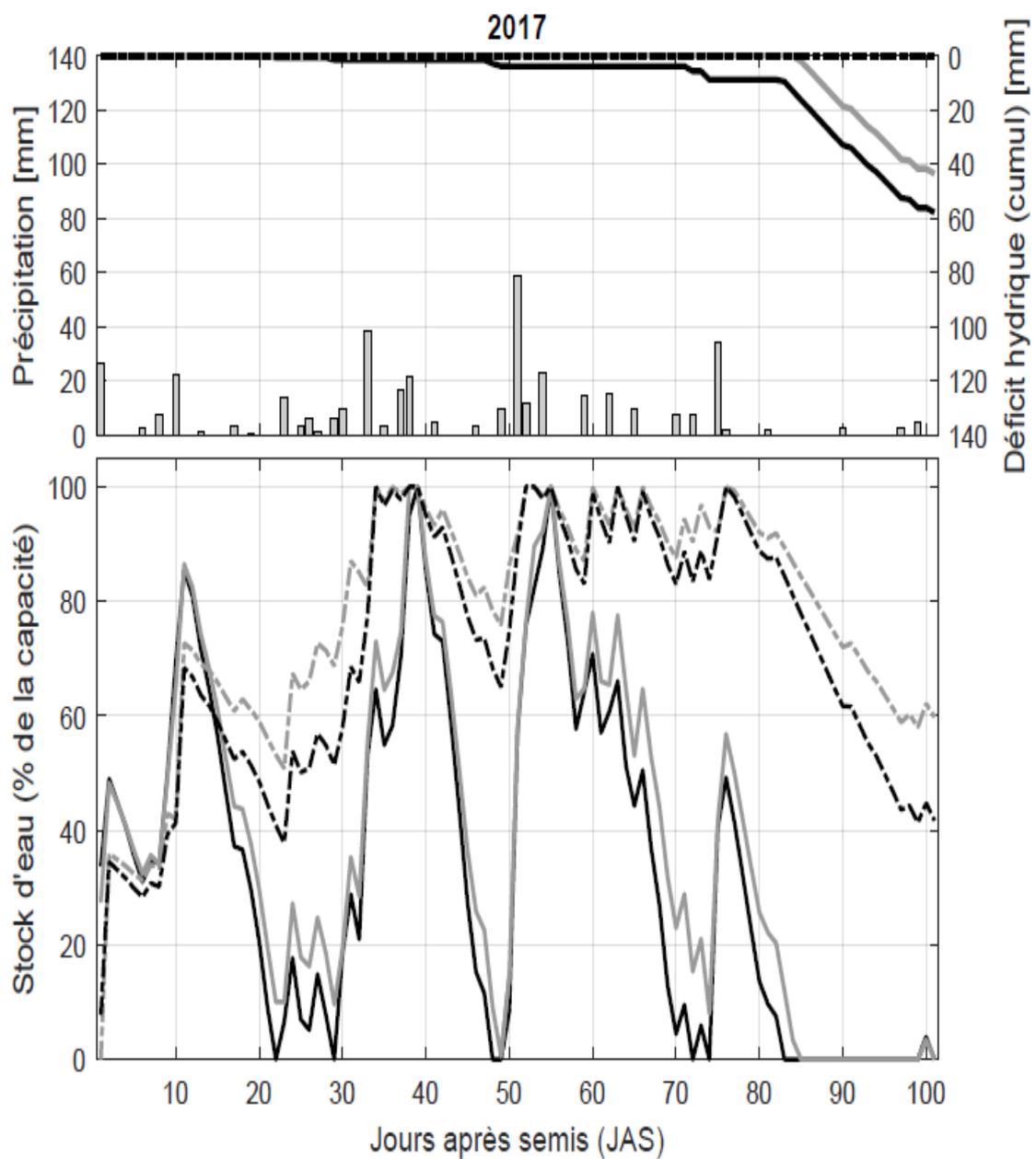


Figure 4-8: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2017 pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune. Les courbes au-dessus des barres de précipitation représentent le déficit hydrique cumulé au niveau du mil, c'est-à-dire la différence entre l'évapotranspiration culturelle cumulative et l'évapotranspiration réelle cumulative.

La **Figure 4-9** compare la probabilité de dépassement du stockage en eau du sol pour les quatre types de techniques agricoles. Nous avons choisi de présenter les résultats des années 2015 et 2016 pour mieux afficher la capacité de stockage des techniques pour les périodes excédentaires et déficitaires. L'année 2017 étant aussi déficitaire que 2016 présente les mêmes comportements. Ainsi, la distribution des stocks d'eau était très différente entre les deux saisons : en 2015, pendant 90% du temps le stock d'eau a été rempli au-delà de moitié de la capacité de stockage du sol pour toutes les techniques. Autrement dit, sur la parcelle témoin en 2015, 90% des observations ont montré un stockage en eau du sol au-dessus de 15 mm, par contre pour les mêmes temps d'observations le stockage en eau du sol était de 22 mm sur le cordon pierreux et 63 mm sur le zaï et la demi-lune. De plus, pour aucune des techniques le stock d'eau n'a été totalement vidé en 2015. Cela montre que l'année 2015 a permis un stockage suffisant et permanent de l'eau sur toutes les techniques.

Par contre en 2016, le stock d'eau du sol a été vidé pendant au moins 30% du temps dans les parcelles témoins et cordon pierreux. Le zai et la demi-lune ont subi très peu d'assèchements. Ceci démontre l'efficacité des techniques de zaï et de demi-lunes à maintenir l'eau disponible pour atténuer l'effet néfaste des poches sèches. Ces résultats montrent également la sensibilité de ces systèmes agricoles aux variabilités climatiques car entre deux saisons pluviométriques le stockage en eau du sol est différent entre les pratiques agricoles. Les techniques agricoles réagissent différemment face au même régime climatique.

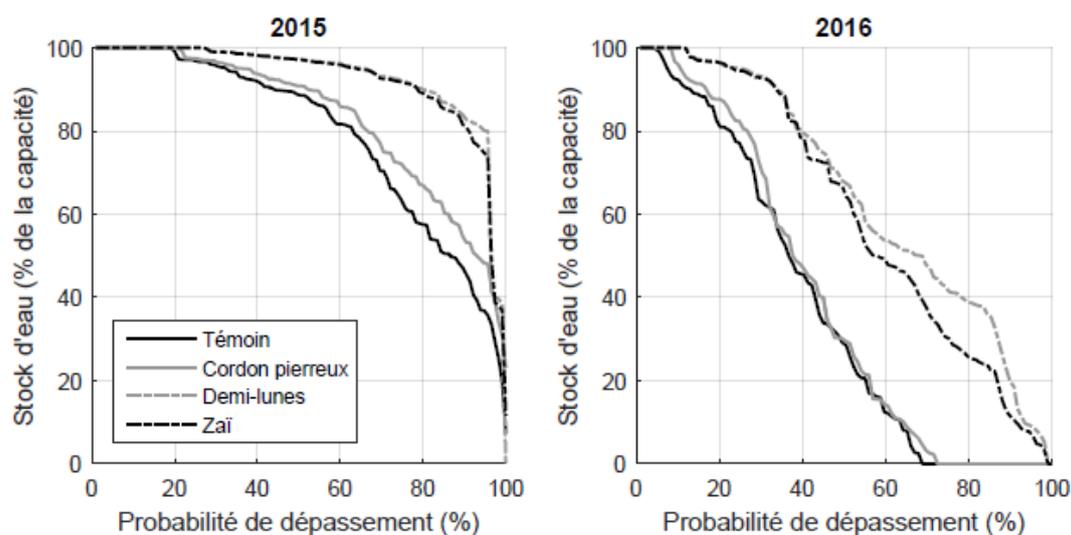


Figure 4-9: Probabilité de dépassement du stockage de l'eau du sol en 2015 et 2016 pour les quatre types de parcelles.

Les **Figures 4-10 et 4-11** montrent des photos des parcelles agricoles 72 et 71 JAS respectivement en 2016 et 2017. Des tiges naines et sèches sont visibles sur les parcelles témoins et cordons pierreux en 2016 après l'apparition des poches sèches de 12 à 14 jours dans la seconde moitié de la campagne agricole. En 2017, toujours sur les mêmes parcelles on note un retard de croissance des plantes à cause de l'apparition précoce de la poche sèche de 11 jours en début de campagne. Ces observations indiquent ainsi, l'effet néfaste des poches de sécheresses sur la croissance des plants. Ces constatations n'ont pas été faites sur les parcelles de zaï et de demi-lune qui ont au contraire montré des tiges saines, hautes et toutes vertes. Ces résultats illustrent l'efficacité des techniques de zaï et de demi-lunes à maintenir l'eau disponible pour les plantes et limiter ainsi les effets négatifs des périodes de sécheresse pour la culture du mil.

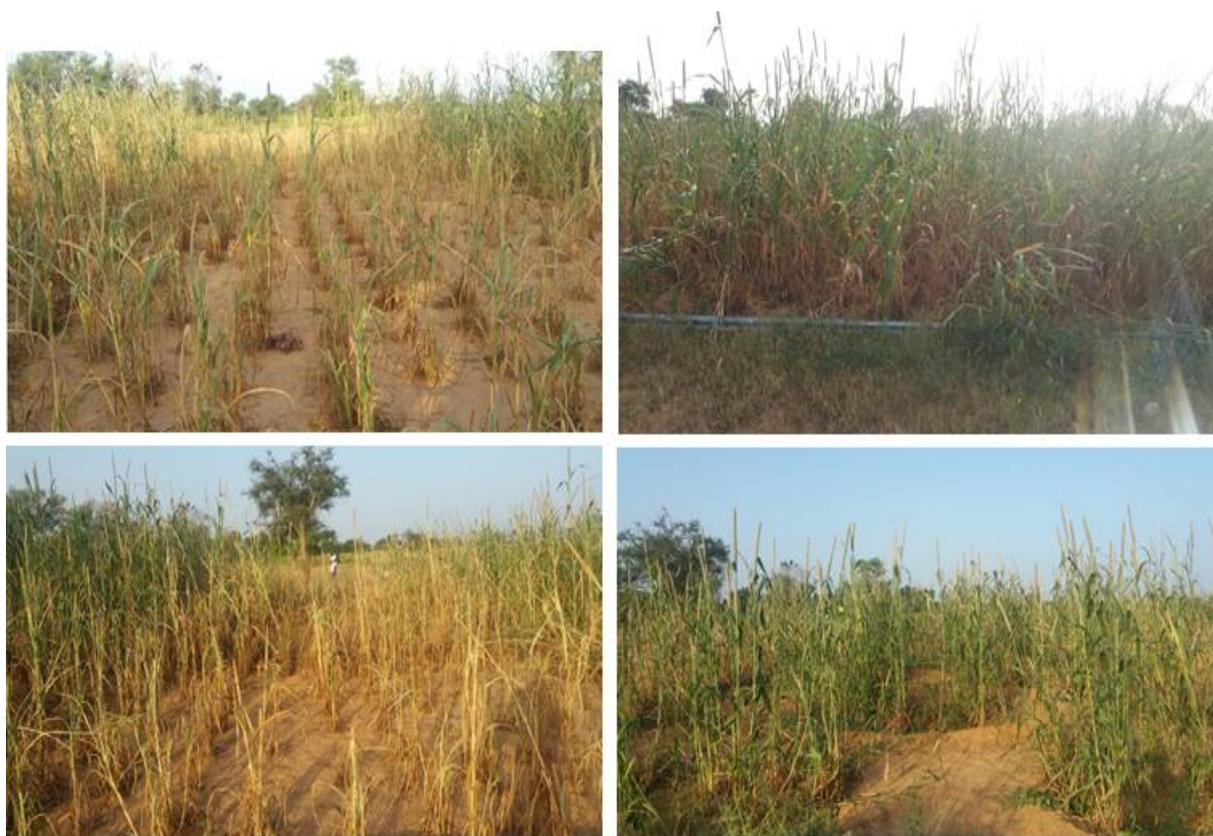


Figure 4-10: Photo prise en 2016 illustrant la croissance des cultures du mil 72 JAS selon différentes techniques agricoles. Témoin (en haut, à gauche), cordon pierreux (en bas, à gauche), zaï (en haut, à droite) et demi-lune (en bas, à droite). Photo : Zouré Cheick Oumar.



Figure 4-11: Photo prise en 2017 illustrant la croissance des cultures du mil 71 JAS selon différentes techniques agricoles Témoin (en haut, à gauche), cordon pierreux (en bas, à gauche), zaï (en haut, à droite) et demi-lune (en bas, à droite). Photo : Zouré Cheick Oumar.

4.4. Effets des techniques sur la production agricole

Les rendements en grains indiqués dans le **Tableau 4-3** témoignent de la performance des techniques agricoles, comme cela a également été rapporté par Araya et al. (2015). Les différences de rendements de mil obtenus à partir des parcelles expérimentales durant les campagnes 2015, 2016 et 2017 sont présentées dans ledit tableau. Les faibles rendements sont enregistrés dans les parcelles témoins et les plus grands rendements dans les parcelles de zaï et de demi-lunes. Le stockage de l'eau du sol et les valeurs de rendements déterminées sur les parcelles durant les campagnes agricoles montrent une corrélation positive entre ces deux paramètres parce que les grandes valeurs de rendements sont enregistrées dans les parcelles avec les meilleurs stockages en eau du sol.

Tableau 4-3: Rendement moyen des grains de mil enregistré sur chaque parcelle pour les années 2015, 2016 et 2017

Parcelle	Bloc	Rendement grain (kg/ha)		
		2015	2016	2017
Témoin	A	252.5	176.3	164.2
	B	297.1	217.0	178.4
Cordon pierreux	A	710.6	661.8	571.8
	B	700.2	627.3	578.6
Zaï	A	1438.1	972.7	1091.4
	B	1237.0	1013.9	1033.4
Demi-lune	A	1944.0	2177.3	1453.9
	B	1791.3	2220.9	1593.2

Les meilleures conditions hydrologiques fournies par les techniques CES sont clairement transcrites par les rendements plus élevés des cultures au cours des trois années. On remarque que les rendements des cultures sont systématiquement plus élevés en 2015 par rapport aux autres années, même si on aurait pu s'attendre à une amélioration plusieurs années après la mise en place des pratiques, comme le suggèrent des auteurs (Bayala et al., 2011; Africare and Inera, 2014b). Malgré le semis tardif en 2015, les pluies abondantes et bien réparties ont assuré la demande en eau des plantes même sans l'aide des pratiques agricoles au vu des besoins hydriques satisfaits sur les parcelles témoins (**Figure 4-6**). Seules les parcelles de demi-lunes ont permis un stockage d'eau suffisant pour atténuer les stress hydriques récurrents observés en 2016 et susciter des rendements supérieurs à ceux observés en 2015. Les récoltes sont également meilleures en 2016 qu'en 2017, sauf pour les parcelles zaï. Les quantités de pluie de ces années sont similaires, mais les précipitations ont été réparties plus uniformément en 2016, surtout au début de la saison. La première période de stress se situe autour de 55 JAS en 2016, alors que le déficit hydrique est déjà observé 22 JAS en 2017 (**Figure 4-8**), ce qui aurait pu induire un retard de développement préjudiciable. De plus, Doto, (2016) a montré que les périodes de stress qui surviennent en fin de saison pendant la période de remplissage des grains peuvent fortement affecter les rendements agricoles, même lorsque le développement de la plante n'a pas été perturbé. Ceci est particulièrement observé en 2017, car après l'évènement pluvieux qui s'est produit à 70 JAS, il n'y a pas eu d'autres précipitations significatives avant la récolte (**Figure 4-8**).

Le modèle SCS-CN modifié est basé sur la méthode bien connue d'évapotranspiration de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Ainsi, le développement des cultures est basé sur la durée

théorique de chaque stade de développement traduit par le coefficient cultural (K_c). Par conséquent, le modèle ne tient pas compte du rôle joué par le climat dans certains phénomènes végétaux tels que la capacité de la plante à réduire son besoin en eau pendant les périodes de sécheresse. En réalité, des périodes de stress hydrique prolongées ou fréquentes affectent le développement de la plante, comme cela a été observé pour les parcelles témoins et cordon pierreux. L'évapotranspiration réelle des cultures sur les parcelles témoins et cordon pierreux serait réduite par rapport à celles se développant sur les parcelles de zaï et demi-lune. Dans le modèle, les reprises d'évapotranspirations sont surestimées sur les parcelles témoins et cordons pierreux en période sèches pluviométriques et de retard de croissance des plantes.

Les rendements grains indiquent la performance agronomique des techniques agricoles. En analysant particulièrement chaque année, ces valeurs de rendement appuient les principaux résultats de l'évaluation hydrologique. Les cordons pierreux apportent une légère amélioration en termes de réduction du ruissellement et de disponibilité de l'eau du sol par rapport au témoin. Les parcelles de zaï et de demi-lune permettent d'atténuer presque toutes les périodes de sécheresse en réduisant fortement le ruissellement. Cependant, nous pouvons également remarquer que garantir la disponibilité de l'eau pour les plantes n'est pas le seul avantage de ces techniques de collecte de l'eau: même lorsque les précipitations semblent satisfaire les besoins en eau de la plante sans nécessiter de pratiques agricoles comme en 2015 où les parcelles témoin ont offert des rendements très faibles comparativement aux techniques CES. En effet, en plus de fournir de meilleures conditions hydrologiques, les pratiques agricoles permettent de retenir plus efficacement les amendements organiques qui restent dans les dépressions ou en amont des cordons pierreux au lieu d'être lessivés par ruissellement (Zougmore et al., 1993; Zougmore et al., 2004a; Kiema et al., 2008; WOCAT, 2017a). Éviter cette perte de nutriments pourrait augmenter significativement le rendement de grains (Suzuki et al., 2016; WOCAT, 2017a). De plus, l'amélioration de l'humidité du sol et l'augmentation du front d'humectation (comme le montre la **Figure 3-11**) peuvent améliorer le développement des racines et induire des changements importants dans les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol, améliorant ainsi l'infiltration, l'aération et la disponibilité des nutriments (Kagambèga et al., 2017). Par exemple, Kaiser et al. (2017) ont rapporté une grande activité de termites dans les champs de zaï. Les sillons creusés par les termites agissent comme des zones préférentielles d'écoulement, augmentant considérablement l'infiltration. Ces effets des pratiques agricoles sur les propriétés du sol (physique : action mécanique donc diminution de la densité apparente ; chimique : Capacité d'échange cationique de la matière organique et biologique : activité de

termites) justifient la prise en compte d'une capacité de stockage spécifique de la technique dans le modèle, comme l'ont également reconnu Soulis and Valiantzas, (2012). L'utilisation de ces techniques peut à plus long terme (habituellement cinq ans pour zaï et 15 ans pour les cordons pierreux) mener à la restauration complète du sol et atténuer tout besoin supplémentaire de pratiques agricoles (Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2014; WOCAT, 2017b).

Cette étude a montré l'impact des pratiques agricoles sur les propriétés des sols, notamment la modification des propriétés hydrodynamiques du sol. Néanmoins, même si les demi-lunes sont toujours apparues comme la meilleure option en termes de performances hydrologiques et agronomiques, ces changements lents induits par la technique semblent plus préjudiciables que favorables à plus long terme. En effet, les conductivités hydrauliques saturées des demi-lunes ont diminué d'année en année et ont été les plus faibles de toutes les parcelles en 2017 du fait des dépôts de particules fines dans la cuvette (Jasmin et al., 2015; Kagambèga et al., 2017). En 2016, les rendements enregistrés au niveau de la demi-lune ont été meilleurs comparativement aux rendements enregistrés en 2015 et 2017. On note également qu'en 2015, quatre (4) événements exceptionnels (pluie supérieure à 50 mm) ont été observés. En 2017 aussi, un (1) événement exceptionnel a aussi été observé quelques jours après une pluie de 20 mm (voir chapitre 3, section 3.1.1). Cette faible performance agronomique notée en 2015 et 2017 comparativement à 2016 est due à la forte pluviométrie associée au caractère peu filtrant de la demi-lune (Wildemeersch et al., 2015; WOCAT, 2016b; Kagambèga et al., 2017). En effet, en cas de forte pluie, le caractère peu filtrant associé à l'importance du volume de l'ouvrage provoque l'inondation des plants et la stagnation de l'eau pendant au moins 2 jours comme cela a été constaté sur les parcelles. L'engorgement des plants a dû affecter les rendements agricoles de la demi-lune durant les campagnes agricoles 2015 et 2017. Les simulations avec un modèle tridimensionnel d'infiltration et d'écoulement de surface permettraient à l'avenir d'avoir des informations sur l'optimisation de la conception des demi-lunes en termes de densité de plants, de dimensions caractéristiques, d'inondation et de drainage en eau dans le sol.

5. Conclusion partielle

Les expériences de terrain menées au Sahel burkinabé ont démontré le potentiel de réduction du ruissellement par les techniques de conservation des eaux et des sols, en particulier le zaï et les demi-lunes. Le modèle hydrologique développé a permis de reproduire le ruissellement mesuré sur les pratiques agricoles et pour les conditions météorologiques des saisons 2015, 2016 et 2017. Il a également permis de fournir une évaluation de la dynamique de l'eau du sol, qui s'avère très différente entre les types de techniques, mais aussi fortement conditionnée par la distribution des précipitations pendant la saison de culture. Le zaï et les demi-lunes ont pu satisfaire les besoins en eau des cultures durant 2 à 3 semaines pendant les longues périodes de sécheresse, tandis que les cordons pierreux et les semis directs ont connu plusieurs jours de sécheresses agronomiques entraînant des déficits hydriques importants à la fin des saisons. Ces résultats démontrent le potentiel du modèle à être utilisé comme un outil d'aide à la décision pour évaluer la performance hydrologique d'une pratique agricole sous différents régimes climatiques et sous diverses occupations du sol.

L'une des hypothèses du modèle hydrologique est que la technique modifie la capacité de stockage du sol dans la mesure où elle affecte l'hydrodynamique du sol. Cette capacité de stockage devrait évoluer avec le temps jusqu'à son maximum, cependant le modèle ne prend pas en compte cette évolution de l'hydrodynamique du sol. Les études futures devraient s'intéresser à l'évaluation physique de cette capacité maximale de stockage en relation avec la pratique culturale. Ces techniques agricoles permettent d'assurer une disponibilité constante de l'eau et des nutriments pour la culture, ce qui apparaît comme une condition préalable au développement optimal des plantes et à l'obtention de meilleurs rendements. Afin d'améliorer la gestion des sols dans une perspective de changement climatique et d'identifier des pratiques agricoles optimales pour des contextes spécifiques, les prochains chapitres se proposent d'étudier les performances hydrologiques des techniques CES sous conditions climatiques historiques et futures.

Chapitre 5 : Étude des performances hydrologiques des techniques agricoles sur le long terme et optimisation du zaï

1. Introduction

Des efforts sont déployés pour diffuser les bonnes techniques culturales en zone sahéenne auprès des exploitants agricoles dans le but d'assurer une production culturale satisfaisante et durable. Ces efforts sont pour la plupart focalisés sur l'amélioration de la production agricole en relation avec les techniques de conservation des eaux et des sols (Zougmore et al., 2004; Da, 2008; Danjuma et Mohammed, 2015). En réalité, ces techniques permettent d'éviter les pertes importantes de rendements agricoles liées au déficit hydrique en conservant suffisamment d'eau dans le sol pour pallier au manque hydrique lors des épisodes de sécheresses. Des études récentes montrent que la fréquence et la durée des sécheresses semblent être récemment aggravées et pourraient à l'avenir affecter les performances des techniques alternatives (Alhassane et al., 2013; Wildemeersch et al., 2015; Oguntunde et al., 2018; Nassourou et al., 2018). Il serait donc important d'appréhender la capacité des techniques agricoles à limiter les effets négatifs des périodes sèches pour un grand nombre de séries climatiques, plus représentatives de la variabilité rencontrée sur le stockage en eau du sol et de proposer des pratiques plus résilientes au climat. Afin d'identifier de bonnes techniques CES et d'augmenter leur potentiel d'atténuation de la sécheresse, il convient de s'attaquer aux caractéristiques sous-jacentes permettant un stockage optimal de l'eau dans le sol, notamment les dimensions caractéristiques. Ces techniques sont basées sur des aménagements qui se font par une modification manuelle du terrain, affectant ainsi l'écoulement de surface. Cette modification peut se faire par ajustement de la profondeur, de la forme et des dimensions des dépressions creusées.

Ce chapitre 5 vise à étudier les performances hydrologiques des techniques agricoles selon le climat passé dans le but d'appréhender l'impact de la variabilité climatique sur le stockage en eau du sol et de proposer des techniques plus résilientes au climat. Il s'agit tout d'abord d'évaluer l'aptitude des techniques agricoles à atténuer les périodes sèches pluviométriques et ensuite d'analyser les indicateurs de performances hydrologiques des pratiques sur le long terme. Par la suite, nous proposons d'étudier les caractéristiques géométriques du zaï (haute performance hydrologique agronomique comparativement à la demi-lune qui présente des effets de colmatage) sur la base du climat passé dans le but de proposer des dimensions optimales capables d'assurer de façon durable une satisfaction hydrique aux plants. Les

dimensions optimales du zaï proposées à l'issue de cette étude devraient être en mesure d'atténuer au mieux les stress hydriques au regard des différents régimes pluviométriques observés afin de garantir une production agricole adéquate. Le modèle SCS-CN calibré et validé au chapitre 4 a été utilisé pour évaluer les performances des pratiques et optimiser le zaï.

2. Matériels et méthodes

2.1. Données climatiques pour la simulation des performances hydrologiques des techniques culturales

Les séries chronologiques journalières de la pluviométrie et des paramètres météorologiques pour le calcul de l'évapotranspiration de référence Penman-Monteith (Cf. **Chapitre 3-section 2.2**) analysée dans le cadre de cette étude sont celles de la station météorologique de Ouahigouya (13.57°N ; 2.42°O) localisée à 22 km de la zone d'étude. Ces données sont fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) du Burkina Faso et s'étalent sur la période 1961 à 2009, soit 49 années d'observations.

2.2. Définition des indicateurs de sécheresses

Le modèle hydrologique SCS-CN développé dans le cadre de cette étude est utilisé pour simuler l'effet des techniques agricoles sur le stockage en eau du sol en réponse à la variabilité climatique durant la période 1961-2009. Cette mise en œuvre du modèle hydrologique sur les données climatiques historiques observées à la station de Ouahigouya permet d'identifier des indicateurs de performance hydrologique de chaque technique agricole et de situer l'efficacité d'une technique par rapport à l'autre. Dans le cadre de cette étude, l'efficacité hydrologique des techniques est étudiée à l'échelle de la saison culturale c'est-à-dire durant la longueur de la saison de culture du mil. Pour chaque pratique agricole, il s'est agi de déterminer les indicateurs de performances agronomiques tels que :

- Le nombre de jours secs agronomiques dans la saison
- La plus longue période sèche agronomique dans la saison
- La longueur moyenne de la poche sèche pluviométrique pouvant assécher le stock d'eau du sol
- Le déficit hydrique saisonnier

Les différents termes permettant une meilleure compréhension des performances hydrologiques des techniques doivent être définis. Il s'agit de la poche sèche pluviométrique, la poche sèche agronomique, la date de début de saison, la date de fin de saison, la durée de la saison et l'indice standardisé de précipitation (IPS, SPI en anglais) qui sont décrites dans la **section 2.2.1**.

2.2.1. Indicateurs de sécheresse pluviométrique

L'indice de précipitation standardisé (IPS) ou indice de Nicholson définit l'écart des précipitations d'une année par rapport aux précipitations moyennes annuelles historiques (McKee et al., 1993). L'IPS est définie pour des précipitations annuelles. Il est basé sur des calculs statistiques pour une période d'au moins 30 ans. C'est un indice efficace pour distinguer les périodes humides des périodes sèches dans une longue chronique de précipitation. L'IPS est calculé à partir de l'équation 26

$$IPS = \frac{P - P_m}{\sigma} \quad (26)$$

Avec IPS, l'indice de précipitation standardisé de l'année i , P [L] est la pluie de l'année, P_m [L] est la pluie moyenne interannuelle, et σ [L] est l'écart-type de la série des pluies annuelles. La classification des années en terme d'année humide et d'année sèche est faite suivant les plages de variation de l'IPS présentées dans le **Tableau 5-1** (Mehdaoui et al., 2018).

Tableau 5-1: Classification de la sécheresse selon l'IPS adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (d'après Mehdaoui et al., 2018)

Valeurs de l'indice IPS	Catégorie de sécheresse
2.0 et plus	Extrêmement humide
1.50 à 1.99	Très humide
1.0 à 1.49	Humide
-0.99 à 0.99	Normal
-1.0 à -1.49	Modérément sec
-1.50 à -1.99	Sévèrement sec
-2.0 et moins	Extrêmement sec

La poche sèche pluviométrique. C'est le nombre de jours consécutifs sans pluie « utile » pour la plante au cours de la saison pluvieuse. Pour cela la définition d'un seuil de précipitation en dessous duquel on peut considérer que le jour est sec est nécessaire. Dans cette étude, on

considère une journée sèche comme une journée où on a enregistré moins de 5 mm de pluie (Nasri and Moradi, 2011; Doto, 2016). Le seuil de 5 mm est obtenu sur la base des calculs de l'évapotranspiration journalière de la culture de mil dans la zone d'étude sur la période de 1961 à 2009. Dans cette étude, le nombre de poches sèches supérieures de 7 jours, 14 jours, 21 jours et la plus longue poche sèche à l'échelle de la saison culturale ont été retenus comme indicateurs de sécheresse pluviométrique. Ces indicateurs seront utilisés pour identifier les performances hydrologiques des techniques culturales, c'est-à-dire la capacité de la technique à stocker l'eau pour faire face à la récurrence et à la longueur des poches sèches.

La date de début de saison agricole. Durant les 3 années d'expérimentation, nous avons commencé la saison agricole pendant le mois de juillet après avoir enregistré un évènement pluvieux suffisant pour permettre le semis. Cette considération tient compte des habitudes des paysans de la localité de toujours semer durant les mois de juin et juillet après une pluie jugée suffisante pour démarrer la saison, mais jamais en mai pour éviter les faux départs de saison pluvieuse. La date de début de saison correspond donc à la date de semis. Dans la suite de cette étude, nous utilisons la méthode de Sivakumar (Stern et al., 2006) adaptée à la zone sahélienne pour déterminer les dates de début de saison pendant la période historique. Ainsi, d'après l'approche Sivakumar, le début de saison correspond à la date (d1) pour laquelle au moins 20 mm de pluie est enregistrée en 3 jours consécutifs après le 1er mai sans période sèche supérieure à 9 jours dans un intervalle de 30 jours. Cette définition nécessite la connaissance de trois paramètres : la quantité de pluie tombée, le nombre de jours pluvieux et le seuil minimal de pluie permettant de déterminer les périodes sèches. Pour convenir au mieux avec les pratiques locales du bassin de Tougou, la définition de Sivakumar a été utilisée et restreinte aux dates postérieures au 1^{er} juin.

La date de fin de saison agricole. Dans la zone d'étude, la fin de la saison correspond à la période au cours de laquelle il n'y a plus de pluie après le mois de septembre conduisant à un assèchement des cultures. Elle correspond à la date de récolte. Dans cette étude la date de fin de saison est définie comme la date (d2), soit 105 jours après la date de semis (d1). Cette définition à une considération agronomique, car elle correspond à la durée du cycle cultural du mil.

La longueur de la saison agricole. Elle correspond à la durée du cycle cultural du mil qui reste une constante de 105 jours (Allen et al., 1998).

2.2.2. Indicateurs de sécheresses agronomiques

La poche sèche agronomique. Elle correspond à la période de jours consécutifs pendant laquelle le stock en eau du sol disponible pour les besoins de la plante est nul. C'est la période de flétrissement où la plante se trouve dans l'incapacité de puiser l'eau liée du sol pour satisfaire ses besoins. La poche sèche agronomique induit ainsi, un déficit hydrique pour la plante.

La plus longue poche sèche agronomique de la saison. Elle correspond au maximum des périodes sèches agronomiques enregistrées durant le cycle cultural du mil soit 105 jours après la date de semis. Les longues poches sèches agronomiques induisent des déficits hydriques importants. C'est un indicateur de l'impact que la plus longue période sans précipitation pendant la saison des cultures a sur l'approvisionnement en eau des plants.

La longueur moyenne de la poche sèche pluviométrique pouvant assécher le stock d'eau du sol. Elle correspond à la moyenne des poches sèches pluviométriques calculer sur la période historique susceptible d'entraîner un déficit hydrique pour la culture du mil. Cette poche sèche pluviométrique pouvant entraîner un déficit hydrique du sol est fonction de la quantité d'eau stockée dans le sol et des reprises de l'évapotranspiration culturale. Elle peut donc varier entre les différentes techniques, entre les différentes saisons et les conditions antécédentes rencontrées.

Le déficit hydrique. Il correspond à la différence entre la demande en eau des cultures et l'eau disponible dans le sol durant les différents stades de développement de la plante (Kowalczyk et al., 2016). Il apparaît lorsque l'état hydrique du sol ne permet pas de satisfaire les besoins en eau des végétaux (Duponnois et Dia, 2013). Dans cette étude le déficit hydrique apparaîtra lors du tarissement du stock d'eau dans le sol c'est-à-dire lorsque S_{max} est nulle. Pour chaque saison, il exprime la différence entre le cumul de l'évapotranspiration culturale et le cumul de l'évapotranspiration réelle.

2.3. Formulation mathématique de l'optimisation de la géométrie du zaï

En rappel (**voir chapitre 2-section 5.1**), le zaï pratiqué à consister à creuser des poquets de 40 cm de diamètre et de 10 à 15 cm de profondeur. Ils sont espacés en quinconce de 80 cm. En réalité, la taille des poquets et leur espacement observés dans la pratique varient selon le type de sol, selon les régions et on observe de manière pratique que plus le poquet est grand, plus l'espacement est important (Zougmoré et al., 2000b). Ainsi on peut constater que sur une

surface donnée, le zaï de petits diamètres avec des espacements minimums occasionneront une grande densité de plant, mais seront sensibles aux déficits hydriques car les besoins en eau seront plus élevés. À l'opposé, le zaï de grands diamètres avec des espacements importants occasionneront une faible densité de plants, mais réduiront les besoins hydriques des plants. Il s'agira donc dans cette partie d'optimiser la géométrie du zaï pour maximiser la production tout en assurant de façon durable les besoins hydriques de la plante. L'optimisation des caractéristiques géométriques de la technique du zaï vise à proposer une technique plus résiliente aux périodes de sécheresse afin d'assurer une production agricole satisfaisante et durable.

Les caractéristiques géométriques telles que le diamètre, la profondeur et les espacements entre poquets conditionnent la collecte de l'eau de ruissellement par la technique sur une surface donnée. L'aptitude de la technique à améliorer le stockage de l'eau dans le sol et supporter les périodes de sécheresse est essentiellement due à sa capacité à collecter et accumuler l'eau en surface, puis à la redistribuer dans le sol par infiltration. Ainsi, optimiser les caractéristiques géométriques de la technique du zaï revient à trouver la meilleure combinaison entre les paramètres (diamètre, profondeur, espacements) influençant l'abstraction initiale, l'infiltration, l'évaporation de l'eau contenue dans les dépressions (la fraction de la parcelle occupée par les dépressions) et les besoins en eau des plants (évapotranspiration) qui permettraient d'éviter tout stress hydrique et d'assurer une densité suffisante de plants. Il convient de rappeler que l'abstraction initiale I_a directement dérivée des données mesurées de pluie et de ruissellement peut être retrouvée en calculant le volume d'eau stocké en surface dans chaque poquet de zaï sur l'ensemble de la parcelle tel qu'exprimé par **l'équation 27**.

$$I_a = \frac{dp \times \pi \times R^2 \times h}{A} \quad (27)$$

Avec I_a [L] l'abstraction initiale ou pluie limite de ruissellement, dp le nombre de poquets de zaï dans la parcelle expérimentale, R [L] le rayon d'un poquet, h [L] la profondeur du poquet et A [L²] la surface de la parcelle. Les poquets de zaï supposés uniformes sont assimilés à des cylindres de rayon R et de hauteur h .

Ainsi avec les dimensions expérimentales ($R = 20$ cm, $h = 10$ cm, $A = 200$ m² et $dp = 327$), on montre que $I_{a,max} = 20.5$ mm reste proche de la valeur trouvée à partir des données de la pluie et du ruissellement qui est de 20 mm.

La démarche adoptée pour l'optimisation de la géométrie du zaï est la suivante :

La performance de la technique à limiter l'effet des poches de sécheresse étant essentiellement due à sa capacité à collecter l'eau de surface et à la mettre à disposition sur le long terme à la plante, nous avons ainsi, redéfini les paramètres qui influencent le stockage en eau du sol (Ia et ETc) en fonction du diamètre, de la profondeur et des espacements de la technique du zaï. L'abstraction initiale est fonction du nombre de poquets dans la parcelle, de l'espacement latéral et longitudinal entre les poquets. Les reprises d'évapotranspiration et d'évaporation sont liées respectivement à la densité des plants et à la portion de surface occupée par les dépressions dans la parcelle de zaï par rapport à la parcelle témoin.

Les contraintes géométriques utilisées dans le cadre de cette optimisation tiennent compte de valeurs réalistes et praticables et permettent une réduction du nombre de variables liées aux caractéristiques de la technique. La **Figure 5-1** illustre la configuration des différents paramètres géométriques de la technique du zaï.

- L'espacement latéral (E_{lat}) est égal à $2D$
- L'espacement longitudinal (E_{long}) évolue entre la valeur de D et 200 cm. L'espacement longitudinal est au moins égal à D pour permettre un apport conséquent de l'eau dans le poquet. Il est limité à 200 cm, car au-delà de cet espacement la densité des plants dans la parcelle est très faible.
- Le diamètre (D) évolue entre 20 et 80 cm.
- La profondeur des poquets peut évoluer jusqu'à 25 cm.

Les **équations 28, 29, 30 et 31** permettent de calculer respectivement le nombre de poquet dans la parcelle ; le facteur permettant de calculer l'ETp dans la parcelle de zaï comparativement à la parcelle témoin en tenant compte du nombre de plantes dans les deux parcelles ; la part de la surface de zaï occupée par les poquets et enfin l'abstraction initiale :

$$d_p = \frac{A}{E_{lat} \times E_{long}} \quad (28)$$

Avec d_p le nombre de poquets dans la parcelle de zaï, A [L^2] la surface de la parcelle, E_{lat} [L] l'espacement latéral, E_{long} [L] l'espacement longitudinal

$$K_A = \frac{d_p}{N_p} \quad (29)$$

Avec K_A un facteur indiquant une densité de plants dans la parcelle de zaï par rapport à la parcelle témoin, N_p le nombre de plants dans la parcelle témoin

$$A_p = \frac{d_p \frac{\pi D^2}{4}}{A} \quad (30)$$

Avec A_p la part de la surface de zaï occupée par les poquets, D [L] le diamètre des poquets

$$I_a = \frac{d_p \times \left(\frac{\pi D^2}{4} \times h\right)}{A} = \frac{\pi \times D \times h}{8 \times E_{long}} \quad (31)$$

Avec I_a [L] la pluie limite de ruissellement, h [L] la profondeur du poquet.

La routine est la suivante :

- Pour chaque année de 1961 à 2009, on identifie les dates de début et de fin de la saison de culture du mil à l'aide de la méthode de Sivakumar (**Cf. section 2.2.1**)
- Pour chaque saison de culture identifiée, on exécute le modèle hydrologique SCS-CN modifié sur toutes les combinaisons de paramètres possibles (sous les contraintes précitées) pour chercher la valeur minimale de I_a qui permettrait d'éviter toute sécheresse agronomique. Pour se faire, on écarte toutes les combinaisons pour lesquels la satisfaction hydrique n'a pas pu être atteinte. Les combinaisons de paramètres satisfaisants (qui peuvent être différents entre les saisons) sont retenues après une analyse plus détaillée des combinaisons qui satisfont la plupart des saisons qui ne nécessitent pas un compromis trop conséquent en termes de densité culturale.
- Une routine implémentée sous l'environnement Matlab utilisant les **équations 28 à 31**, permet de faire tourner le modèle SCS-CN avec toutes les combinaisons de paramètres pour trouver la profondeur minimale dans la gamme de valeur autorisée afin d'éviter tout stress hydrique. On obtient ainsi les valeurs de D , E_{long} , E_{lat} , K_A , et h permettant d'éviter le stress hydrique pour chaque saison durant la période 1961-2009.

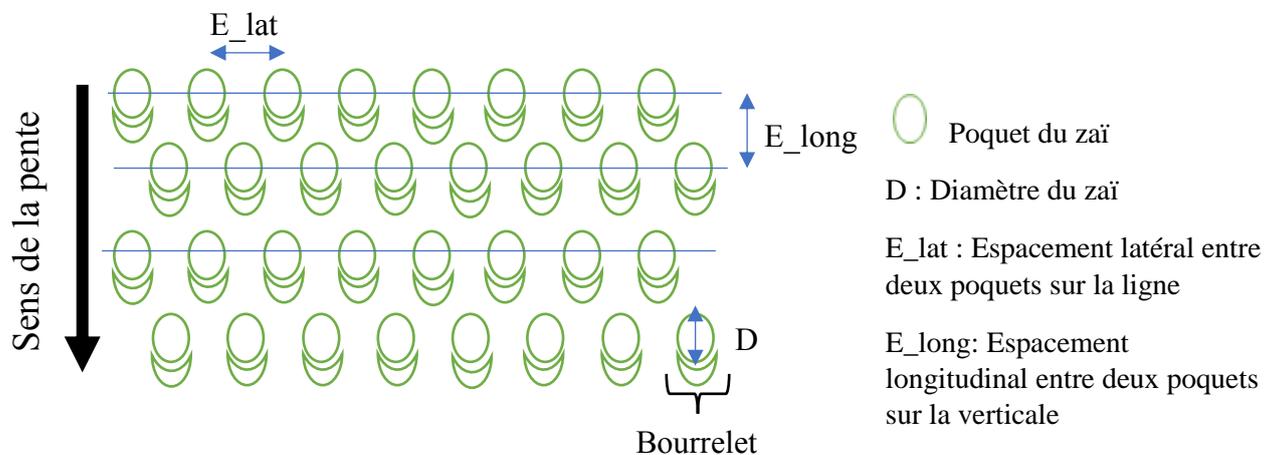


Figure 5-1: Schéma indiquant les paramètres géométriques de la technique du zaï

3. Résultats et discussions

3.1. Analyse des performances hydrologiques des techniques sur la base du climat historique

3.1.1. Indicateurs de sécheresse pluviométrique

Les données de précipitations observées sur 49 années sont utilisées pour mettre en évidence les incidences des poches sèches sur le stockage en eau du sol, mais aussi pour montrer le potentiel des techniques agricoles à les atténuer. La **Figure 5-2** montre pour chaque saison, le nombre de poches sèches supérieur à 7, 14 et 21 jours en fonction des indices de précipitation standardisés (IPS). Sur cette figure, les points bleus sur l'axe des abscisses indiquent des saisons avec des poches sèches observées de moins d'une semaine. Ensuite, à une unité au-dessus de l'axe des abscisses, les points bleus montrent les saisons avec au moins une poche sèche supérieure ou égale à une semaine. Ceux de couleur orange sont des saisons avec au moins deux semaines de poches sèches et les grises, les saisons avec au moins 3 semaines de poches sèches. Ainsi, cette figure montre que les années 1965, 1967, 1979, 1992, 1994, 1999, 2002 et 2003 ont été particulièrement pluvieuses avec des poches sèches n'excédant pas une (1) semaine et des IPS compris entre -0.5 et 2. Les années 1972, 1977, 1982, 1983, 1984, 1990, 1997, 2000 et 2004 ont été sévèrement sèches avec des poches sèches longues et/ou répétées. Ainsi, on peut lire les exemples suivants sur le graphe. La saison 2005 a été caractérisée par au moins 3 poches sèches de plus d'une semaine. La saison 1997 a été caractérisée par 4 poches sèches de plus d'une semaine.

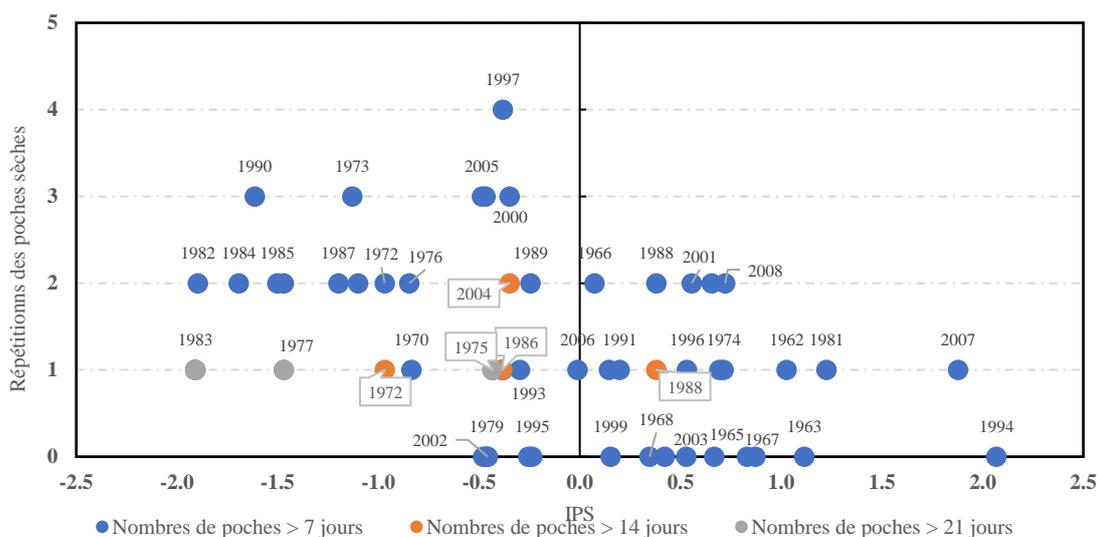


Figure 5-2 : Nombre de poches sèches saisonnier supérieur à 7, 14 et 21 jours en fonction des indices de précipitation standardisés (IPS) observés sur la période 1961-2009. Les années encadrées représentent les saisons qui ont été caractérisée par des poches sèches répétitives de plus de 14 jours et 21 jours.

La **Figure 5-3** présente pour chaque saison, la longueur maximale des poches sèches en fonction des IPS. Ainsi, les années 1975, 1983 et 1977 sont caractérisées par les longues poches sèches de 22, 29 et 37 jours respectivement. La moyenne des plus longues poches sèches observées sur la période 1961-2009 est de 10 jours.

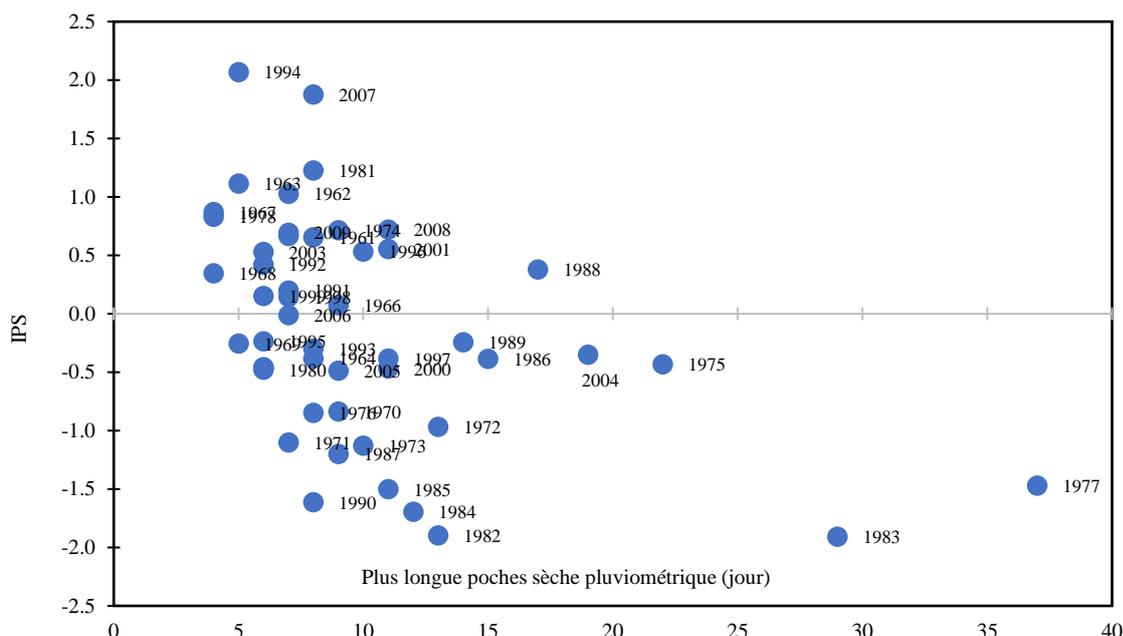


Figure 5-3: Longueur maximale des poches sèches saisonnières en fonction de l'IPS observée sur la période 1961-2009

Les **Figures 5-2 et 5-3** montrent que les saisons caractérisées par plus de deux poches sèches de plus d'une semaine et celles enregistrant au moins une poche sèche continue de plus de 3 semaines sont manifestement des saisons sèches, les IPS variant entre -1 et -2. Il sera donc intéressant d'appréhender la performance des techniques à faire face aux poches sèches longues et/ou répétitives. Ainsi, les années présentant au moins 3 poches sèches répétitives de plus de 2 semaines (1984, 1990, 1997 et 2000) et celles caractérisées par au moins 14 jours de poches sèches (1972, 1977, 1983 et 2004) semblent être de meilleurs indicateurs de sécheresse pour apprécier la performance hydrologique des techniques agricoles. Il peut arriver que des années apparemment humides dissimulent de longues poches sèches. C'est le cas de l'année 1988, apparaissant comme une année normale (IPS = 0.38) alors qu'elle a connu une longue poche sèche pluviométrique de 17 jours. Cela s'explique par sa forte pluviosité en début de campagne qui a contribué à augmenter le cumul de pluie annuel.

3.1.2. Aptitude des techniques à atténuer les poches sèches pluviométriques

Dans la longue série des données de pluie annuelles observées, les années 1990, 1997 et 2000 (la liste n'est pas exhaustive) ont été caractérisées par des poches sèches pluviométriques répétitives de plus d'une semaine (Cf. **Figure 5-2**). Ces années ont été retenues pour appréhender l'impact des poches sèches répétitives sur les performances hydrologiques des techniques agricoles. La **Figure 5-4** illustre l'évolution pluviométrique et les performances des pratiques agricoles à supporter les poches sèches pluviométriques pour les saisons 1990, 1997 et 2000. Ainsi, en 1990, on a enregistré 5 poches sèches pluviométriques d'au moins une semaine chacune. Les stocks d'eau dans les parcelles témoins et cordon pierreux ont été asséchés cinq fois, concourant à la non satisfaction des besoins en eau des cultures. Les poches sèches pluviométriques ont engendré des sécheresses agronomiques d'au moins une semaine survenues 56, 69, 83 et 95 jours après le semis (JAS). Ces poches sèches ont pu être néfastes pour les rendements, car elles ont duré plus d'une semaine. En revanche, les parcelles de zaï et de demi-lune ont été capables de stocker suffisamment d'eau pour atténuer ces périodes de sécheresse et fournir suffisamment d'eau pour les plantes pendant toute la durée de ces poches. Au total, les parcelles témoins et cordons pierreux ont été soumis à une sécheresse agronomique cumulée (correspondant à un stockage nul du sol) de 41 jours et 36 jours respectivement. Ces sécheresses ont entraîné un déficit hydrique de 151 mm et 134 mm respectivement sur la parcelle témoin et sur la parcelle de cordon pierreux.

On remarque une faible performance de la demi-lune par rapport au zaï pendant les périodes de sécheresse répétées et longues à la **Figure 5-4**. Cela pourrait s'expliquer par le caractère non filtrant de la demi-lune qui expose l'eau en surface permettant ainsi des pertes importantes d'eau par évaporation, surtout pendant les périodes de fortes demandes évaporatoires. Ce phénomène peut être aussi expliqué par le fait que nous ayons considéré la même capacité de stockage pour le zaï et la demi-lune (les données relativement faibles de ruissellement pour la demi-lune ne permettant pas de calibrer sa capacité de stockage) ce qui oblige un stockage en surface plus long dans la cuvette de demi-lune lorsque le sol est saturé permettant ainsi des reprises d'eau importantes lors des fortes demandes d'évaporation. Ce résultat montre l'utilité d'infiltrer l'eau rapidement dans le sol afin de limiter les pertes évaporatoires et satisfaire les besoins en eau des plants. Les mêmes comportements hydrologiques sont observés sur les techniques pour les années 1997 et 2000, car les précipitations étant similaires à celle observée en 1990 (**Figure 5-4**).

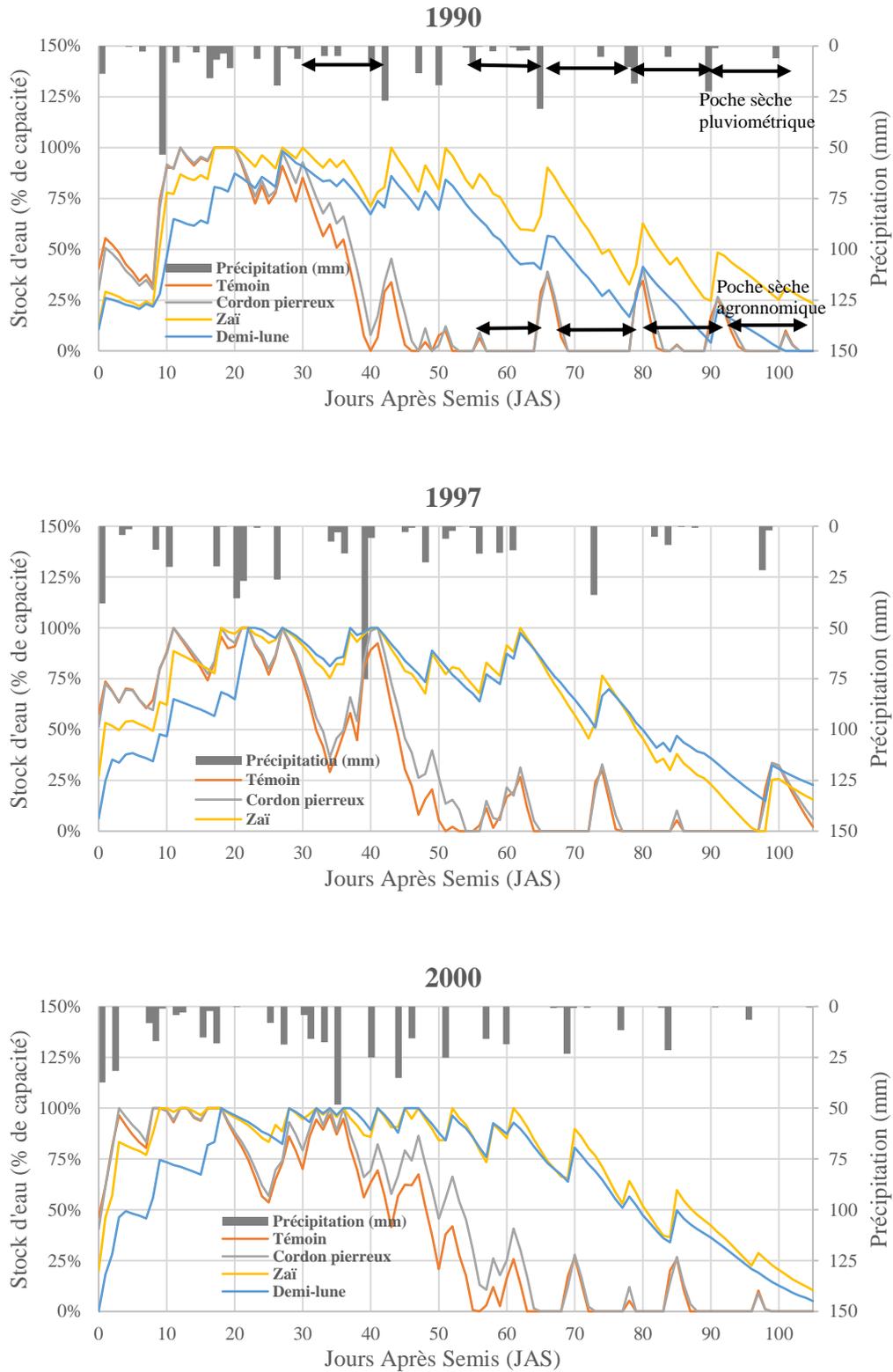


Figure 5-4: Evolution pluviométriques des saisons de pluie 1990, 1997 et 2000 et performances des pratiques agricoles à limiter l'effet des poches sèches pluviométriques répétitives n'excédant pas trois (3) semaines chacune.

En référence à la série des données de pluie annuelles observées, les années 1972, 1982, 1983 ont été caractérisées par de longues poches sèches pluviométriques, d'au moins 14 jours (**Figure 5-5**). Ainsi, en 1972, un mois après le début de la campagne les premières précipitations ont permis de recharger les stocks d'eau du sol pour toutes les pratiques agricoles. Cependant, 30 JAS les stocks d'eau sous toutes les pratiques sont restés faibles jusqu'à 70 JAS et parfois même asséchés pendant de courtes périodes dans la parcelle témoin et cordon pierreux. Nous avons observé que 70 JAS quand le stockage en eau du sol a atteint sa valeur minimale pour toutes les techniques, on n'a enregistré seulement trois événements pluvieux de moins de 20 mm pendant 41 jours. L'occurrence des longues poches sèches 52 JAS, a provoqué l'assèchement continu du témoin et du cordon pierreux pendant 53 jours. Quant au zaï et à la demi-lune, l'assèchement a duré 41 jours jusqu'à la fin de la saison. Pour cette saison, les parcelles témoins, cordon pierreux, zaï et demi-lune ont connu respectivement des déficits hydriques saisonniers de 238.2, 231.3, 89, 59 mm correspondant à 60%, 57%, 22% et 15% des besoins en eau du mil. Pour les années sévèrement sèches comme l'ont été les saisons 1972, 1982 et 1983 les techniques de zaï et de demi-lune n'auraient pas pu atténuer les effets néfastes des longues poches sèches de plus de 2 semaines surtout quand la sécheresse est à l'origine d'une fin de campagne précoce.

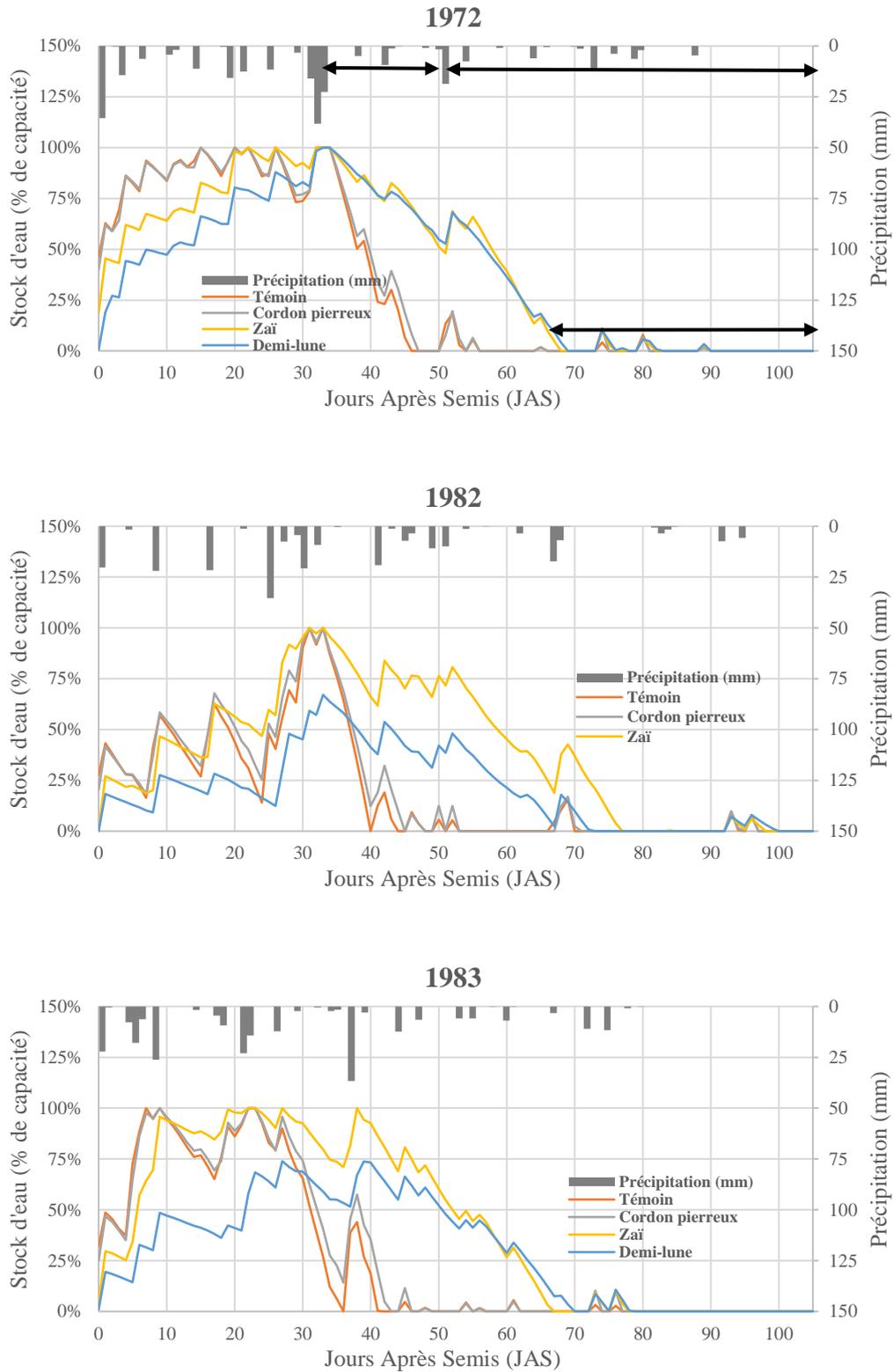


Figure 5-5: Evolution pluviométriques des saisons de pluie 1972, 1982 et 1983 et Performance hydrologique des pratiques agricoles face aux longues poches sèches de plus de trois semaines

3.1.3. Performances hydrologiques des pratiques agricoles

La **Figure 5-6 (a)** montre la dispersion saisonnière du nombre de jours secs agronomiques pour chaque technique agricole durant la période entre 1961 et 2009. De façon générale, le nombre de jours secs agronomiques est faible sur les techniques de zaï et de demi-lune comparativement au témoin et au cordon pierreux. En effet, le nombre de jours secs agronomiques par saison varie entre 0 à 60 jours sur la parcelle témoin, 0 à 56 jours sur le cordon pierreux, 0 à 30 jours sur le zaï et la demi-lune. En moyenne le nombre de jours secs agronomiques dans la saison est de 21, 17, 3 et 3 jours respectivement sur le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune. Ainsi, le cordon pierreux réduit de 18 % le nombre de jours secs agronomique comparativement au témoin. Il est réduit à plus de 85% par le zaï et la demi-lune.

La **Figure 5-6 (b)** met en évidence la durée de la poche sèche pluviométrique pouvant engendrer un stock nul dans le sol pour les différentes techniques agricoles. Généralement, la durée de la poche sèche pluviométrique pouvant générer un stock nul dans le sol est plus longue sur les techniques de zaï et de demi-lune comparativement aux techniques de cordon pierreux et de semis direct. En effet, la séquence sèche pluviométrique pouvant tarir le stock d'eau du sol varie de 1 à 9 jours sur le témoin, 2 à 11 jours sur le cordon pierreux, 6 à 24 jours sur le zaï et 9 à 28 jours sur la demi-lune. En moyenne la poche sèche pluviométrique pouvant assécher le stock d'eau du sol est de 4, 5, 16 et 20 jours respectivement sur le semis direct, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune.

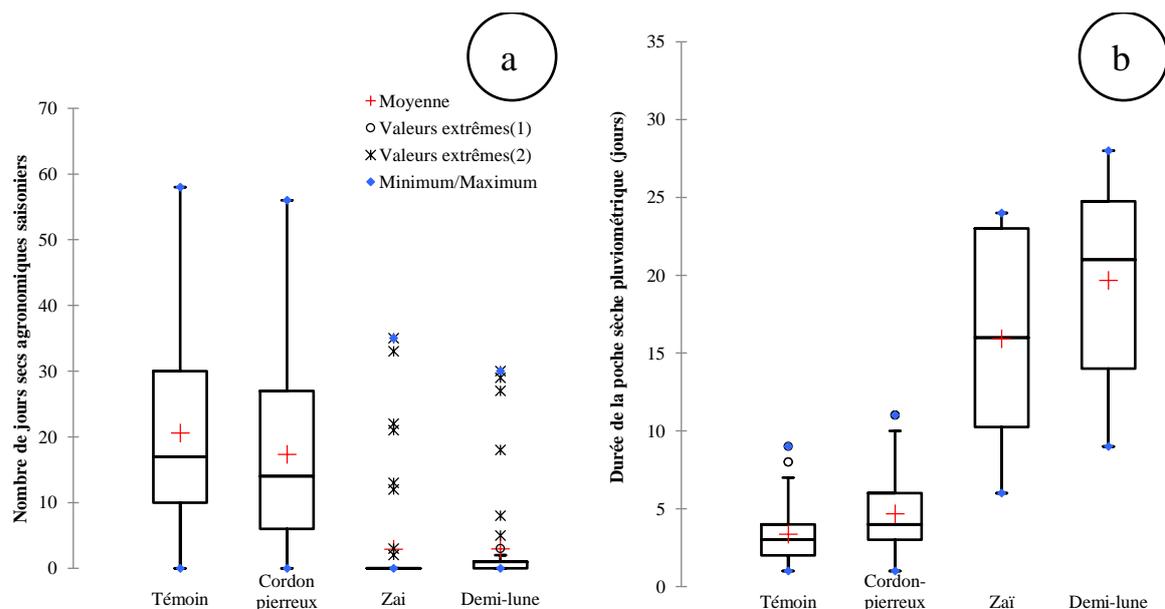


Figure 5-6: Performances hydrologiques des pratiques agricoles simulées sur la période 1961-2009
 (a) Nombre de jours secs agronomiques, (b) Durée de la poche sèche pluviométrique conduisant à la poche sèche agronomique.

Le **Tableau 5-2** synthétise les performances hydrologiques des pratiques agricoles observées sur la période 1961-2009.

Tableau 5-2: Statistique des performances hydrologiques saisonnières des pratiques agricoles sur la période historiques 1961-2009

Techniques agricoles	Moyenne saisonnière sur 49 années d'observations (1961-2009)					
	Durée de la poche sèche pluviométrique conduisant à un déficit hydrique (jours)	Nombre de jours secs agronomiques (jours)	Nombre de périodes sèches agronomiques	Plus longue poche sèche agronomique (jours)	Stockage de l'eau du sol (mm)	Déficit hydrique (mm)
Semi-direct	4	21	4	11	17	74
Cordon-pierreux	5	17	3	10	22	62
Zaï	16	3	1	2	50	7
Demi-lune	20	3	1	2	54	4

Le **Tableau 5-2** résume les moyennes des performances hydrologiques des techniques agricoles par saison simulée sur 49 années d'observation. Le tableau permet de constater que les longues poches sèches agronomiques observées sur le témoin et le cordon pierreux sont réduites par le zaï et la demi-lune. La poche sèche agronomique est prononcée sur le zaï et la demi-lune pour quelques rares années (1972, 1977, 1982, 1983, 2004) lorsque les poches sèches pluviométriques observées ont excédé 3 semaines. Les longues poches sèches pluviométriques observées montrent une forte variabilité avec une durée moyenne de 15 jours. En moyenne les longues poches sèches agronomiques sont de 11, 10, 2 et 2 jours respectivement sur le semis direct, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune. Les longues poches sèches agronomiques observées sur le témoin sont réduites de 70% par le zaï et la demi-lune. Aussi, le déficit hydrique observé est réduit à plus de 90% par le zaï et la demi-lune comparativement au semis direct.

On note une forte corrélation (supérieure à 0.92) entre le nombre de jours secs agronomiques et le déficit hydrique saisonnier (**Annexe 5**). Aussi, lorsque le nombre de jours secs agronomiques devient important, le déficit hydrique reste faible sur la demi-lune et le zaï comparativement au cordon pierreux et au témoin. Ceci s'explique par la forte demande d'évapotranspiration sur le témoin et le cordon pierreux, liée aux nombres de plants proportionnellement plus importants sur ces parcelles. La connaissance de ce déficit hydrique en relation avec le nombre de jours secs agronomiques pourrait être d'un intérêt pratique dans

la zone d'étude en cas de possibilité d'irrigation de complément (à partir d'un bassin de rétention par exemple).

Cette étude a montré l'efficacité de la technique de zaï et de demi-lune à atténuer les poches sèches répétitives de 2 à 3 semaines dans la saison. Ces techniques agricoles sont d'une grande importance pour l'agriculture au Sahel, car elles présentent des alternatives pour atténuer les effets néfastes de la sécheresse sur la production agricole. En effet, les études de Wildemeersch et al., (2015) sur la tendance des indicateurs de sécheresse sur la période 1980 à 2010 au Sahel ont montré une hausse significative des périodes sèches d'une semaine pouvant attendre en moyenne 3 répétitions par saison. Ainsi, le zaï et la demi-lune seront mieux adaptés pour l'agriculture en milieu sahélien.

3.2. Analyse de l'optimisation de la géométrie du zaï

Le modèle hydrologique SCS-CN développé a permis de tester plusieurs paramètres de géométrie afin de proposer les géométries optimales qui permettent d'éviter le maximum de sécheresse agronomique pour toutes les années testées et de maximiser la production agricole.

Ainsi, pour éviter tout stress hydrique avec les petits diamètres (D20 à D50), les espacements longitudinaux nécessaires doivent atteindre 2 m, les profondeurs des poquets 160 cm et la densité culturale 2 fois réduite comparativement à la parcelle témoin (**Figure 5-7a**). On peut aussi remarquer que lorsque les saisons sont sèches ($IPS < 0$) les espacements et les profondeurs nécessaires afin d'éviter toutes sécheresses agronomiques sont importants par rapport aux années humides ($IPS > 0$). En effet, en année sèche pour satisfaire les besoins en eau de la parcelle, la densité des cultures doit être réduite pour limiter les reprises d'évapotranspiration et les profondeurs des poquets doivent être plus importantes pour assurer le stockage d'eau nécessaire pour faire face aux périodes sèches. En année humide, les pluies sont abondantes et les poches sèches sont de courtes durées, ce qui autorise une grande densité de plants avec des espacements entre des poquets réduits. Cependant, en saison humide des longues poches sèches peuvent être observées comme c'est le cas pour les années 1961 et 1968 nécessitant ainsi un espacement plus important afin de limiter la demande totale en eau des cultures et satisfaire les besoins en eau de la parcelle.

Pour éviter tout stress hydrique les grands diamètres (D60 à D80) permettent un espacement réduit par rapport aux petits diamètres, de faibles profondeurs de 2 cm mais au prix de très

faibles densités culturales 3 fois réduites par rapport à la parcelle témoin (**Figure 5-7b**). En effet, la grande capacité de collecte d'eau générée par ces grands diamètres associés à la faible densité culturale permet d'atténuer toutes les poches sèches agronomiques, mais ne permet qu'une densité culturale 2 à 3 fois plus petite que celle de la parcelle expérimentale de zaï (déjà 30% plus faible qu'une culture en semis direct).

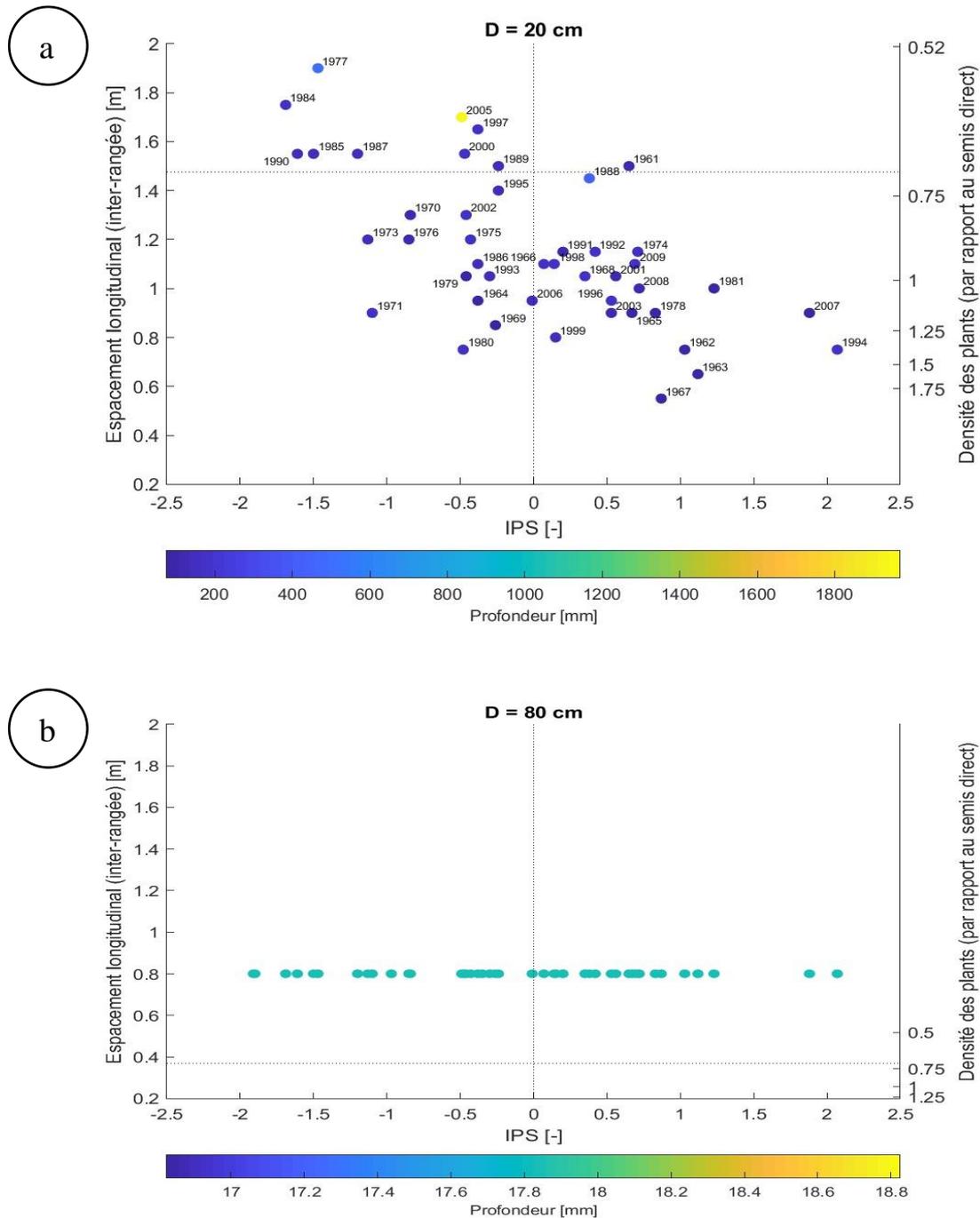


Figure 5-7: Combinaison des paramètres géométriques conduisant à la satisfaction hydrique des plants pour les années de la période historique de 1961 à 2009. Paramètres géométriques associés au diamètre (a) 20 cm et (b) 80 cm. Sur la figure (b) les valeurs des années n'ont été associées pour permettre une meilleure lisibilité, les paramètres géométriques obtenus étant les mêmes pour toutes les années.

La **Figure 5-8** montre pour chaque saison de l'année, la combinaison des différentes contraintes de géométrie (diamètre, espacement, profondeur, densité de plants) qui aurait conduit à la satisfaction hydrique des cultures sur la période 1961 à 2009. Autrement dit, la figure présente pour les diamètres D30 (**Figure 5-8a**) et D40 (**Figure 5-8b**), pour chaque année prise individuellement sur la période 1961-2009, la combinaison de l'espacement longitudinal, de la densité de plants et de la profondeur des poquets nécessaires qui auraient assuré la satisfaction hydrique des plants. Ainsi pour satisfaire les besoins hydriques des plants pour toutes les années observées, il aurait fallu des zaï de diamètre 30 cm, d'espacements longitudinaux 180 cm avec des profondeurs de 20 cm ou encore des zaï de diamètre 40 cm, d'espacements longitudinaux 140 cm avec des profondeurs de 12 cm. Cependant chercher à satisfaire les besoins hydriques des plantes pour toutes les années conduirait à une densité culturale 3 fois plus faible comparativement à une culture en semi-direct. C'est pourquoi, nous cherchons à garantir au moins la densité culturale de la parcelle expérimentale de zaï qui est de 70% comparativement à une parcelle à semis direct. Cette option, de garantir au moins une densité agricole de 70% (comparativement à une parcelle à semis direct) sur une parcelle de zaï nous conduit à la satisfaction hydrique des plantes pour 90% des années testées lorsque l'on retient les dimensions proposées dans le **Tableau 5-3**.

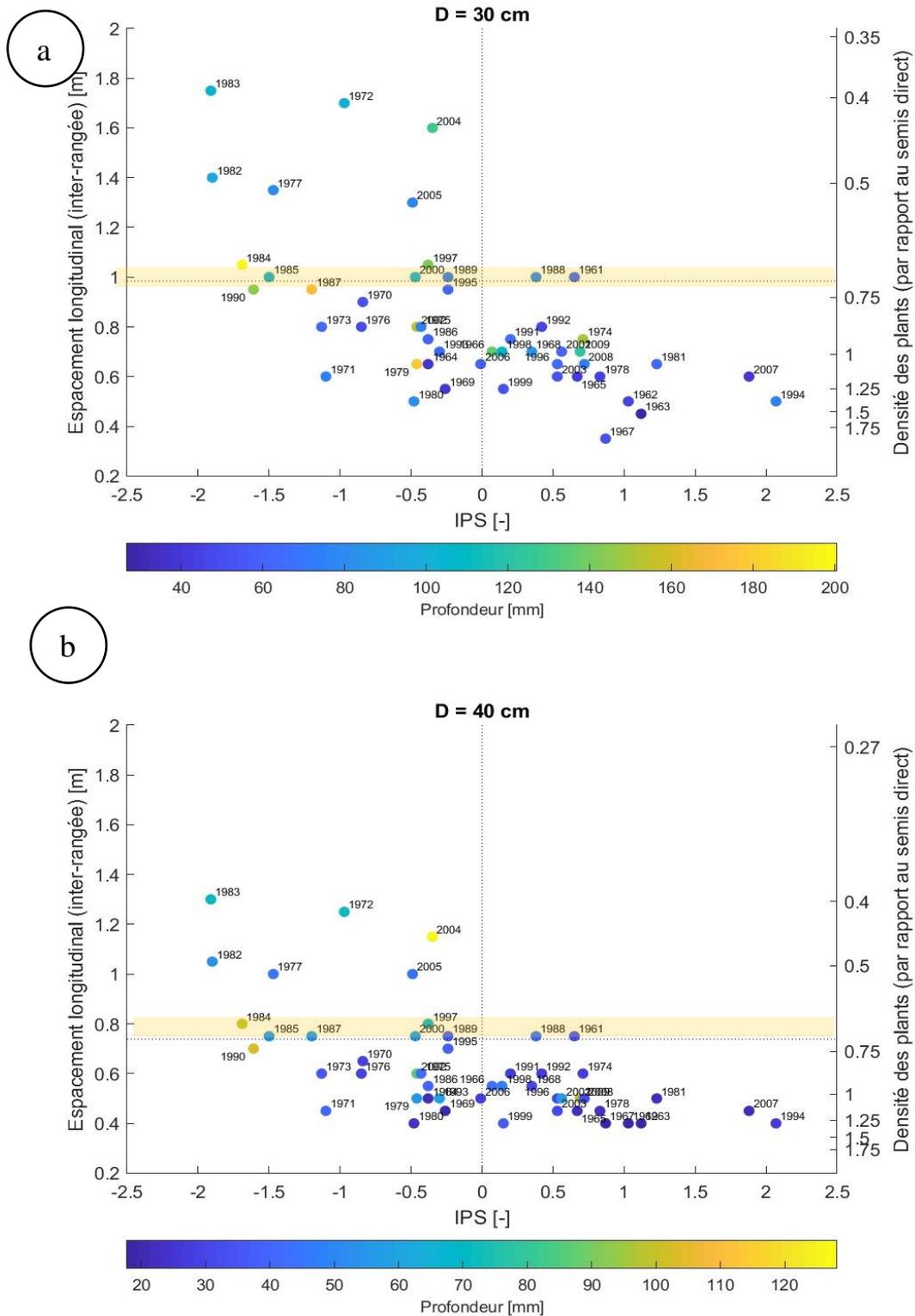


Figure 5-8 : Combinaison des paramètres géométriques conduisant à la satisfaction hydrique des plants pour les années de la période historique de 1961 à 2009
Paramètres géométriques associés au diamètre (a) 30 cm et (b) 40 cm.

Le choix de la géométrie optimale est fonction du taux de satisfaction hydrique des années testées et du maintien de la bonne densité agricole. Ainsi, le **Tableau 5-3** présente les propositions de caractéristiques géométriques des poquets de zaï qui apparaissent optimales par rapport aux critères définis :

Tableau 5-3 : Caractéristiques géométriques optimales des poquets de zaï

Caractéristiques géométriques des poquets de zaï	Définition	Proposition 1	Proposition 2
D (cm)	Diamètre	30	40
E_lat (cm)	Espacement latéral	60	80
E_long (cm)	Espacement longitudinal	100	80
H (cm)	Profondeur	16	10
K _A (%)	Densité de plants	70	65

La bande orange sur la **Figure 5-8** sépare les années qui auraient été satisfaites des années déficitaires si les dimensions des zaï retenues avaient été implémentées dans le passé.

Ainsi, pour les géométries retenues :

- **Les besoins hydriques de la plante sont assurés pour 90% des années testées.** Avec les dimensions proposées, il n'aurait pas été possible de satisfaire les besoins hydriques des plants pour 10% des années observées. Autrement dit, sur la période historique les chances de production auraient été de 9 années sur 10 avec les dimensions de zaï proposées. En effet, sur 49 années testées seulement les besoins hydriques de 6 années (1972, 1977, 1982, 1983, 2004 et 2005) ne peuvent pas être comblés si l'on cherche à satisfaire les besoins en eau d'une densité culturale d'au moins 70% des plants par rapport à la parcelle témoin. Ces saisons sévèrement sèches caractérisées par de longues poches sèches pluviométriques de plus de 3 semaines auraient engendré respectivement pour les années mentionnées des déficits hydriques de 90, 30, 54, 92, 54 et 21 mm sur la technique de zaï proposée. Cependant, le déficit hydrique sur le semis direct aurait été plus sévère avec respectivement 238, 130, 196, 255, 186 et 128 mm. Il ne sera pas intéressant de chercher à satisfaire les déficits hydriques de ces années exceptionnelles, car cela impacterait sur les rendements agricoles au vu de la densité des plants qui pourrait chuter en dessous du tiers (1/3) par rapport au semis direct.

- *La densité des plants est suffisante pour une production agricole adéquate.* La fiche technique de la variété de mil mise en culture (IKMP5) donne une production moyenne de 1.5 t/ha pour un espacement entre semis de 80x80 cm sur un sol non dégradé (INERA, 2011). Dans notre cas d'étude, la production moyenne sur les 3 années de suivi est de 1.2 t/ha pour un espacement entre semis de 80x80 cm sur un sol dégradé soumis à la technique de zaï. Par conséquent, la production agricole est satisfaisante pour la géométrie utilisée dans le cas de l'expérimentation. Aussi, avec un diamètre de 30 cm et une densité culturale de 60x100 cm on arriverait quasiment à la même production agricole (voir **Tableau 5-3**).
- La géométrie de zaï retenue dans le cadre de l'expérimentation de cette étude aurait été suffisante pour atténuer le déficit hydrique d'au moins 9 années sur 10 si elle avait été installée au cours de la période historique entre 1961 et 2009.

En termes de main-d'œuvre une étude comparative doit être faite entre les dimensions retenues pour déterminer la géométrie qui conduit à moins d'effort physique. La géométrie facile à implémenter pourrait aboutir à une réduction de la main-d'œuvre et du coût d'investissement. Les dimensions retenues permettent de réduire le risque de déficit hydrique et d'assurer une production agricole satisfaisante et durable. Il faudra retenir qu'en ce qui concerne les diamètres de 30 cm, plus d'effort sera sollicité pour creuser les trous un peu plus en profondeur, comparativement aux zaï de diamètre 40 cm ou plus d'effort sera demandé pour creuser les trous plus larges. Il sera probablement plus difficile de creuser en profondeur au vu des sols très compacts dans notre contexte du Sahel, d'où la proposition de privilégier les poquets de 40 cm de diamètre.

4. Conclusion partielle

L'application du modèle hydrologique sur la période récente observée 1961-2009 a permis d'extrapoler les performances hydrologiques des techniques agricoles sur le long terme. Cette analyse à long terme a permis un examen plus approfondi de la capacité des techniques à atténuer les effets néfastes des périodes sèches et de proposer des techniques plus résilientes pour faire face à la variabilité climatique. L'étude sur le long terme a montré l'efficacité du zaï et de la demi-lune à atténuer les effets négatifs des poches sèches. Cette performance du zaï et de la demi-lune à contenir les besoins en eau du mil est démontrée par leurs capacités à stocker plus d'eau afin de prolonger de 2 à 3 semaines la durée de la poche sèche pluviométrique pouvant conduire à un déficit hydrique. Ces techniques sont mieux indiquées pour l'agriculture en milieu sahélien, cependant la demi-lune nécessiterait des études supplémentaires, car elle favorise le colmatage du sol.

L'étude sur les dimensions du zaï a permis de trouver les dimensions optimales du zaï qui auraient permis un stockage suffisant de l'eau par saison pour faire face au maximum de sécheresses pluviométriques sur la période 1961 à 2009. Les résultats ont montré la capacité du zaï de diamètre 40 cm, espacements 80x80 cm, profondeur 10 cm et le zaï de diamètre 30 cm, espacements 100x60 cm de profondeur 16 cm a atténué le déficit hydrique de 90% des années testées soit 9 années sur 10. Cependant dans les conditions fortement déficitaires (occurrence de longues poches sèches de plus de 2 à 3 semaines), il aurait été difficile de satisfaire les demandes en eau des plants avec les dimensions de zaï proposées. Cette étude d'optimisation a montré que le zaï retenu dans le cadre de l'expérimentation aurait été suffisant pour assurer une production agricole adéquate et durable dans le passé.

Les dimensions optimales du zaï proposées à l'issue de cette étude devraient être en mesure d'atténuer le maximum de stress hydrique susceptible d'apparaître à l'avenir. Le chapitre 6 vise à étudier les performances hydrologiques du zaï optimisé par rapport au climat futur afin de s'assurer de leur capacité à soutenir la production agricole future.

Chapitre 6 : Étude de la performance du zaï dans un contexte de changement climatique

1. Introduction

Depuis la fin des années 1960, le Sahel a connu plusieurs épisodes de sécheresse aux conséquences souvent désastreuses pour le secteur agricole (Camara et al., 2013; Duponnois et Dia, 2013). Ces sécheresses se caractérisent par la diminution des cumuls annuels des précipitations, l'augmentation des températures, l'occurrence des événements extrêmes tels que l'augmentation de la fréquence et de la durée des poches sèches et le décalage des dates de début et de fin de la saison des pluies (IPCC, 2013; Wildemeersch et al., 2015; Aziz and Obuobie, 2017; Nassourou et al., 2018). Ces caractéristiques de sécheresse pluviométrique deviendront très probables et plus sévères à l'avenir et affecteront les stocks d'eau du sol et la productivité agricole surtout dans les zones semi-arides et subhumides de l'Afrique Subsaharienne (IPCC, 2013; Reddy, 2015).

Dans le Sahel ouest-africain, les modifications climatiques observées ont amené les communautés ainsi que les acteurs du développement à mettre en place des stratégies d'adaptation efficaces et efficientes dans différents secteurs de développement tels que l'agriculture, la production animale, l'environnement et l'énergie. Au Burkina Faso, les mesures d'adaptation sur le plan agricole ont concerné la récupération des terres dégradées à travers par exemple le développement des techniques de conservation des eaux et des sols, le renforcement de la résilience des producteurs agricoles face aux changements climatiques à travers par exemple le développement des nouvelles variétés améliorées des cultures et la modification du calendrier cultural et le développement de systèmes d'alerte précoce pour une gestion efficiente des changements climatiques (MERH, 2015).

Pour appréhender les modifications climatiques futures afin d'anticiper sur les conséquences néfastes, plusieurs centres de recherche sur la modélisation du climat dans le monde élaborent des outils (ou modèles) pour simuler la réaction du système climatique aux forçages naturelles et anthropiques. Ces modèles climatiques peuvent être globaux ou régionaux selon l'échelle spatiale de modélisation. Les modèles climatiques globaux (MCG) ont une résolution spatiale grossière de l'ordre de 100 à 250 km (Nikulin et al., 2012). Ces MCG simulent les variables météorologiques à grande échelle spatiale sur l'ensemble de la planète (Giannini et al., 2008). Cependant, les études d'impact du changement climatique à l'échelle parcellaire ou des bassins

versants nécessitent des échelles spatiales plus fines. C'est ainsi que plusieurs programmes ont désagrégé la résolution spatiale des MCGs de l'ordre de 50 km en utilisant les sorties climatiques du projet CMIP5 (Coupled Model Inter-comparison Project phase 5) du programme mondial de recherche sur le climat. Il s'agit des projets PRUDENCE et ENSEMBLE pour l'Europe, NARCCAP pour l'Amérique du Nord et AMMA pour l'Afrique de l'Ouest. Ces projections prennent en compte les hétérogénéités spatiales non ou mal résolues (topographie complexe, couvert végétal, usage des terres, etc.) issues du projet CMIP5 (Rummukainen, 2010; Camara et al., 2013). Les sorties des modèles climatiques couvrent deux périodes : 1951-2005 (données climatiques historiques) et 2006-2100 (données climatiques relatives aux profils représentatifs de concentration RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 des gaz à effet de serre) (Moss et al., 2010).

La sécheresse pluviométrique constitue une menace majeure pour la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance des petits exploitants agricoles. Ainsi, il convient de mieux comprendre le climat futur ainsi que ces impacts sur la production agricole afin de proposer des mesures d'atténuation. Ce chapitre 7 vise à étudier les performances hydrologiques du zaï optimisé par rapport au climat futur. Il s'agira tout d'abord, d'identifier les modèles climatiques issus du projet AMMA-2050 qui reproduisent au mieux le climat observé dans la zone d'étude. Ensuite, nous analyserons les tendances des paramètres de précipitation et de sécheresse qui affectent la production agricole en utilisant les données climatiques futures. De ce fait, les projections climatiques seront fondées sur deux tendances de développement futur : un scénario d'émission « pessimiste » (RCP 8.5) et un scénario d'émission supposé « standard » (RCP 4.5). Enfin, nous analyserons le potentiel du zaï optimisé à satisfaire les besoins en eau du mil aux horizons 2050 et 2099.

2. Matériels et méthodes

2.1. Choix des modèles climatiques

Les données des modèles climatiques globaux (MCG) issues du projet CMIP5 désagrégées sur la zone de l'Afrique de l'Ouest et corrigées pour les biais par la méthode statistique dite CDF-t (Cumulative Distribution Function transform) dans le cadre du projet AMMA-2050 (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine à l'horizon 2050) sont utilisées pour étudier les performances hydrologiques du zaï à long terme. Ces données au pas de temps journalier avec une résolution spatiale de $0.5 \times 0.5^\circ$ sont disponibles pour la période 1950-2099 et couvrent

l'ensemble du territoire du Burkina Faso. Elles sont téléchargeables dans la base de données du projet AMMA-2050 (http://amma2050.ipsl.upmc.fr/CMIP5_AFRICA/). Les variables météorologiques téléchargées sont la précipitation et les températures (moyenne, maximale et minimale) de l'air pour 25 modèles climatiques avec des simulations historiques et futures pour les scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5. Le **Tableau 6-1** présente les modèles climatiques du projet AMMA-2050 utilisés pour identifier les modèles qui simulent au mieux le climat observé de la zone d'étude. Les données d'observation sont celles issues de la station synoptique à Ouahigouya allant de 1961 à 2009.

Les données climatiques du projet CMIP5 sont celles utilisées pour la rédaction du 5^{ème} rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC, 2013).

Tableau 6-1: Liste des Modèles Climatiques Globaux (MCGs) du Projet AMMA-2050

MCGs	Institution
ACCESS1-0	Australian Community Climate and Earth System Simulator (Australian)
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center (China)
bcc-csm1-1-m	
BNU-ESM	
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (Canada)
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italia)
CMCC-CM	
CMCC-CMS	
CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Mark 3.6.0
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GFDL-ESM2G	
GFDL-ESM2M	
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research (Korea)
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (UK)
HadGEM2-ES	
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)
MIROC5	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japan)
MIROC-ESM	
MIROC-ESM-CHEM	
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)
MPI-ESM-MR	
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (Japan)
NorESM1	Norwegian Climate Centre (Norway)
CNRM-CM5	Centre National de Recherche Météorologique (France)
inmcm4	Institute for Numerical Mathematics (Russia)

Les modèles climatiques qui simulent au mieux les données observées sont mis en évidence par comparaison des données historiques simulées aux observations de la même période de 1961 à 2005. Les comparaisons entre les données simulées et les observations ont été faites sur la base des caractéristiques pluviométriques (Ibrahim, 2012; Aziz et Obuobie, 2017; Akinsanola et al., 2018). Les caractéristiques pluviométriques ont concerné les pluies moyennes mensuelles, la fréquence d'occurrence des classes de poches sèches et les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration.

2.2. Evaluation de l'évapotranspiration potentielle

Les données de l'évapotranspiration de référence (ET_0) sont estimées par la formule FAO-Penman-Monteith Température (Allen et al., 1998; Popova et al., 2006) basée uniquement sur les températures minimale et maximale. Raziei et Pereira (2013) ont montré que cette méthode permet d'estimer les valeurs d' ET_0 très proches de celles obtenues avec la formule de Penman-Monteith sous climat semi-aride. La méthode Penman-Monteith Température utilise l'équation Penman-Montheith (**Equation 2 – Cf. Chapitre 3 section 2.2**) en considérant une vitesse de vent constante de 2m/s. La radiation solaire et la pression de vapeur actuelle sont estimées respectivement à l'aide des **équations 32, 33 et 34** (Hargreaves et Samani, 1982; Raziei et Pereira, 2013).

$$R_s = K_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (32)$$

Avec R_s la radiation solaire ($MJm^{-2}/jour$), K_{RS} le coefficient d'ajustement empirique du rayonnement ($^{\circ}C^{-0.5}$) pris égal à 0.16 pour les localités intérieures, T_{max} la température maximale ($^{\circ}C$), T_{min} la température minimale ($^{\circ}C$) et R_a le rayonnement extraterrestre ($MJm^{-2}/jour$).

$$e_a = e^0(T_{min}) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right] \quad (33)$$

Avec e_a la pression de vapeur actuelle. T_{min} pouvant être supérieure à la température de rosée en zone sahélienne, la température de rosée a été corrigée pour l'estimation de la pression de vapeur actuelle

$$T_{rosée} = T_{min} - 2 \quad (34)$$

2.3. Cadre d'analyse des scénarios de changement climatique

L'analyse des précipitations et de l'évapotranspiration selon les scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5 permet d'étudier la résilience de la technique de zaï dans un contexte de changement climatique. Nous étudions ainsi, les tendances des précipitations et des plus longues poches sèches par saison aux horizons 2050 et 2099 pour évaluer le potentiel du zaï à satisfaire les besoins en eau du mil à moyen et à long terme.

Les indicateurs de sécheresse météorologique tels que l'occurrence des poches sèches de moins de 2 semaines et des longues poches sèches de plus de deux semaines dans la saison ont été étudiés dans le **chapitre 5** pour évaluer l'aptitude des techniques culturales à atténuer les effets négatifs liés à ces poches sèches. Le zaï s'est avéré efficace à atténuer les périodes sèches répétitives de 1 à 2 semaines dans la saison. Cependant, les longues poches sèches de plus de 3 semaines sont susceptibles d'engendrer des déficits hydriques pour le zaï. Il s'avère donc nécessaire d'étudier la tendance des longues poches sèches dans le futur pour évaluer l'aptitude des techniques de zaï à faire face à une éventuelle augmentation des longues poches sèches à l'avenir. La plus longue poche sèche de la saison correspond au maximum des périodes sans événements pluvieux supérieurs à 5 mm enregistrés durant le cycle cultural du mil qui est de 105 jours (Allen et al., 1998).

Afin d'étudier la tendance des précipitations et des longues poches sèches par saison pour les différents horizons, le test statistique de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Mavromatis et Stathis, 2011) a été appliqué aux séries de données. Ce test est non-paramétrique et ne tient pas compte de la normalité des données. Par conséquent, les données aberrantes n'affectent pas le résultat du test (Jasmin et al., 2015; Othman et al., 2016). Le test de Mann Kendall a été implémenté sous le logiciel XLSTAT 2016. Selon la formulation du test, l'hypothèse nulle (H_0) suppose qu'il n'y a pas de tendance dans la série et l'hypothèse alternative (H_a) suppose l'existence d'une tendance dans la série. L'hypothèse alternative a été testée au seuil de significativité de 5%. Des valeurs de P-value inférieures au seuil indiquent l'existence de tendance significative, alors que des valeurs de P-value supérieures au seuil indiquent des tendances non significatives dans la chronique des données. L'amplitude et le sens de la tendance (augmentation ou diminution) sont estimés à l'aide de la pente de Sen (Sen, 1968). La procédure à suivre pour le test de Mann Kendall et la détermination de la pente de Sen est détaillée par plusieurs auteurs (Jasmin et al., 2015; Othman et al., 2016; Aziz et Obuobie, 2017).

Les changements projetés des précipitations et de l'évapotranspiration selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été évalués en calculant les différences relatives entre la moyenne des observations et la moyenne des projections aux différents horizons (Aziz et Obuobie, 2017).

L'application du test statistique de Mann Kendall sur les cumuls annuels des précipitations issus des modèles climatiques choisis a permis de déceler deux périodes caractéristiques homogènes de forte tendance dans les séries (voir section 3.4). Il s'agit des périodes 2006 à 2050 (moyen terme) et 2051 à 2099 (long terme). Pour cela, l'impact du changement climatique sur les performances du zaï sera évalué sur les 2 périodes futures (2006-2050 et 2051-2099).

Le zaï de diamètre 40 cm, espacements 80x80 cm, profondeur 10 cm et le zaï de diamètre 30 cm, espacements 100x60 cm de profondeur 16 cm ont montré leurs performances à satisfaire les besoins en eau du mil à presque 90% des années observées (1961 à 2005). Ainsi, connaissant les caractéristiques géométriques des zaï, il est possible d'estimer à partir de **l'équation 31 (Cf. chapitre 5)** la valeur de l'abstraction initiale correspondante à chaque dimension. Cette valeur de l'abstraction initiale utilisée avec les données climatiques projetées (précipitations et ET0) issues des modèles climatiques permet de faire tourner le modèle hydrologique SCS-CN modifié calibré et validé au chapitre 4 afin de prédire le déficit hydrique saisonnier selon les scénarios du climat futur. Le but étant de déterminer le taux de satisfaction hydrique des zaï retenus en termes d'années à soutenir les besoins en eau du mil sur les périodes futures (2006-2050 et 2051-2099).

3. Résultats et discussions

3.1. Variabilité des pluies moyennes mensuelles

Les pluies moyennes mensuelles simulées par les modèles sont comparées à celles observées à la station de Ouahigouya sur la période 1961-2005 (**Cf. Annexe 6**). On constate que seulement trois (3) séries de données climatiques (CanESM2, HadGEM2-ES et MPI-ESM-LR) simulent convenablement le signal des hauteurs moyennes mensuelles des pluies observées en reproduisant les pics de précipitations en août et la saisonnalité des pluies (période de mai à octobre). Les autres modèles surestiment ou sous-estiment largement les quantités de pluie observées et présentent parfois deux pics de précipitation. La **Figure 6-1** présente les modèles ayant reproduit assez convenablement la structure des hauteurs moyennes mensuelles de pluies observées.

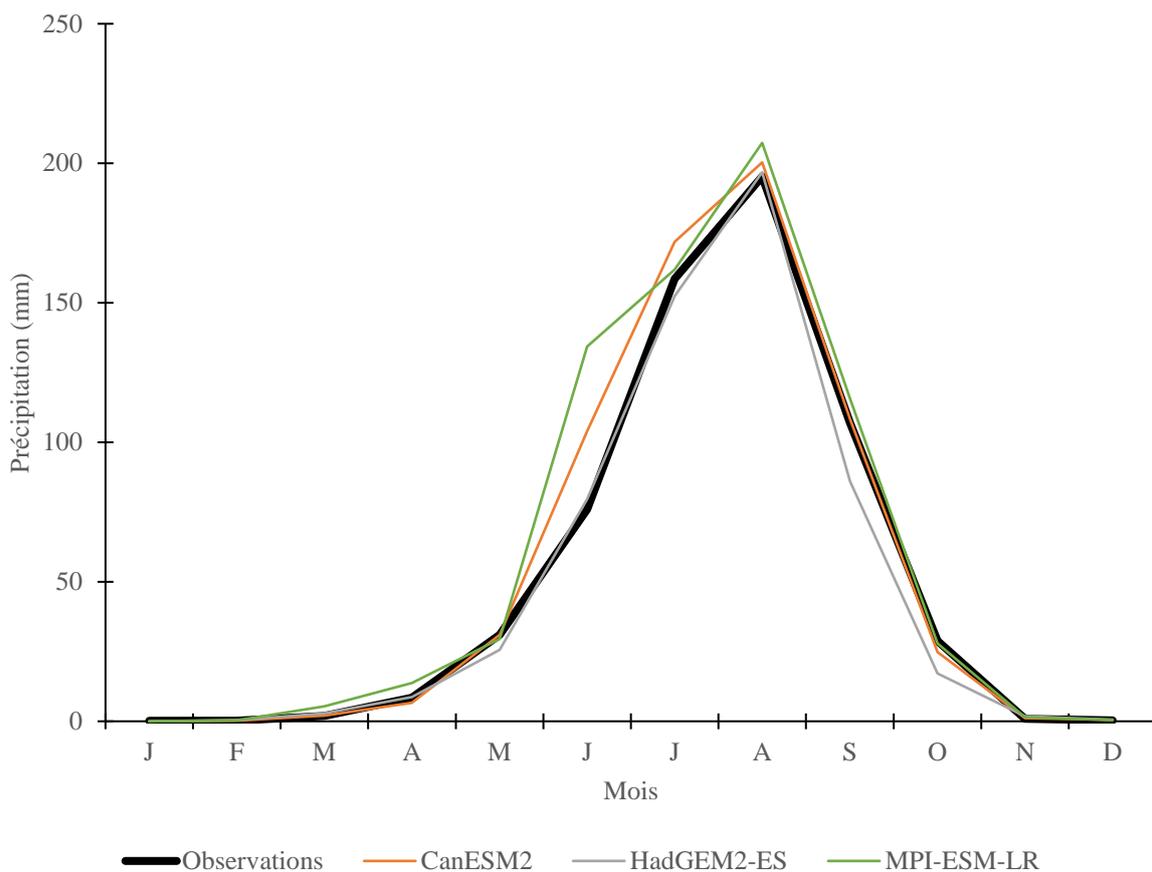


Figure 6-1: Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles observées et simulées des modèles du projet AMMA-2050 ayant reproduit assez convenablement la structure des pluies mensuelles sur la période 1961-2005.

3.2. Fréquence d’occurrence des poches sèches

Les fréquences d’apparition des catégories de poches sèches issues des modèles climatiques sont comparées avec les fréquences d’apparition des classes de poches sèches observées sur la période historique (1961-2005). Ces fréquences sont la résultante des effectifs d’une classe de poche sèche divisée par le nombre total des poches sèches obtenu sur la période historique. Les modèles climatiques CanESM2, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR reproduisent les fréquences d’occurrence des classes de poche sèche similaires à celles des observations. Les fréquences d’apparition des séquences sèches en fonction de leur classe sont consignées dans la **Figure 6-2**

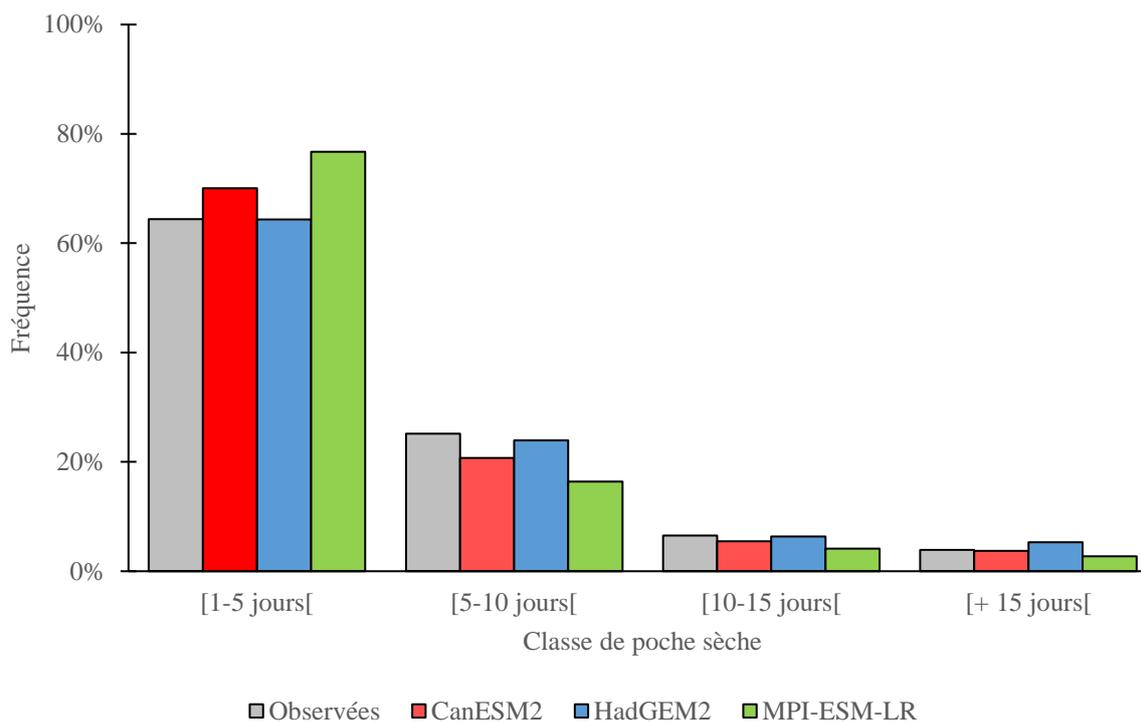


Figure 6-2: Fréquence d'apparition des classes de poches sèches observées et simulées sur la période historique de 1961-2005

L'analyse de la **Figure 7-2** montre que les poches sèches de longues durées (plus de 15 jours) ont des probabilités d'apparition faibles ($< 5\%$). Les plus fortes valeurs de probabilité sont rencontrées pour les séquences sèches de courtes durées (moins de 5 jours) et sont estimées à plus de 60%. Pour les autres classes, les probabilités sont relativement faibles ($< 25\%$). La performance des modèles à reproduire la fréquence d'apparition des poches sèches de plus de deux semaines est intéressante, car ce sont les longues poches sèches qui affectent la performance hydrologique du zaï.

3.3. Variabilité de l'évapotranspiration moyenne mensuelle

La **Figure 6-3** présente l'évolution des évapotranspirations de référence (ET0) moyennes mensuelles estimées à partir des données observées à la station de Ouahigouya et des données simulées par les modèles climatiques retenus sur la période historique 1961-2005. Les modèles reproduisent convenablement les variations saisonnières de l'ET0 sur la période historique. En effet, les écarts relatifs entre les valeurs de l'ET0 moyenne mensuelle simulée et observée varient de -10% à $+9\%$.

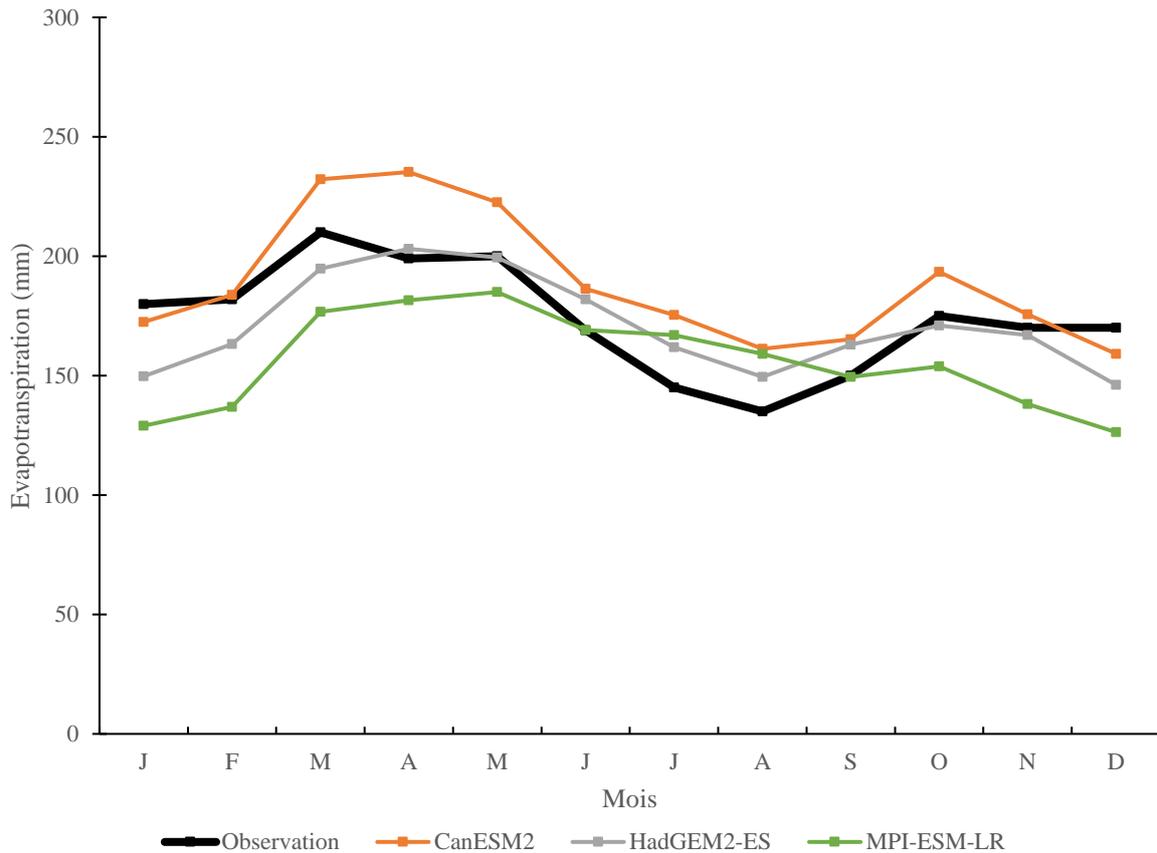


Figure 6-3: Evapotranspiration de référence moyenne mensuelle observées et simulées par les modèles du projet AMMA-2050 sur la période de référence

Cette étude a évalué les caractéristiques des précipitations et de l'ET₀ sur la période historique à partir des sorties de 25 MCG des archives du projet CMIP5 désagrégées et corrigées dans le cadre du projet AMMA-2050. Les approches utilisées pour apprécier les performances des simulations climatiques montrent que trois (3) de ces modèles (CanESM2, HadGEM2-ES et MPI-ESM-LR) sont les plus appropriés pour reproduire les caractéristiques climatologiques observées. Ces modèles ont mieux reproduit les hauteurs de pluies moyennes mensuelles, les fréquences d'apparition des poches sèches et les moyennes mensuelles de l'ET₀. Ainsi, nous utiliserons les données climatiques issues des trois (3) modèles climatiques pour étudier les performances du zaï selon l'évolution du climat. Les études sur l'évaluation de la capacité des modèles du climat à reproduire avec habileté les caractéristiques essentielles des précipitations en Afrique de l'Ouest pour la période historique montrent que les modèles retenus CanESM2, HadGEM2-ES et MPI-ESM-LR donnent de meilleurs résultats (Fowe Tazen, 2015; Aziz and Obuobie, 2017; Akinsanola et al., 2018). L'analyse des données issues de ces modèles

climatiques permettra d'apprécier les variations du climat futur et leur utilisation en entrées du modèle hydrologique SCS-CN modifié préalablement calibré et validé permettra d'appréhender la gamme de performances du zaï dans un climat futur sujet des fortes incertitudes.

3.4. Tendances des précipitations et des longues poches sèches

La **Figure 6-4** montre les tendances des précipitations annuelles et des longues poches sèches par saison issues des données climatiques simulées. Sur la période 2006-2099, sous le scénario RCP4.5, les tendances des précipitations annuelles sont divergentes (à la hausse ou à la baisse) selon les modèles, tandis que sous le scénario RCP8.5 on observe globalement une baisse des précipitations sur la période 2051 à 2099. Pour ce qui concerne les poches sèches on observe généralement une tendance à l'augmentation, lorsque les précipitations annuelles diminuent. La significativité de ces tendances des précipitations annuelles est présentée dans le **Tableau 6-2**.

Sous le scénario RCP4.5, les modèles projettent les tendances suivantes : Le modèle HadGEM2-ES montre une augmentation significative des pluies (P-value = 0.027) sur la période 2006 à 2050 et une diminution non significative des pluies (P-value = 0.71) à l'horizon 2099. Le modèle MPI-ESM-LR montre une baisse non significative des pluies (P-value = 0.67) sur la période 2006 à 2050 et une hausse non significative des pluies (P-value = 0.21) à l'horizon 2099. Et, le modèle CanESM2 montre une augmentation non significative des pluies (P-value = 0.36) sur la période 2006 à 2050 et une diminution non significative des pluies (P-value = 0.23) à l'horizon 2099.

Sous le scénario RCP8.5, les modèles projettent les tendances suivantes : Le modèle HadGEM2-ES montre une augmentation non significative des pluies (P-value = 0.49) sur la période 2006 à 2050 et une diminution significative des pluies (P-value = 0.002) à l'horizon 2099. Le modèle MPI-ESM-LR montre une hausse significative des pluies (P-value = 0.02) sur la période 2006 à 2050 et une baisse significative des pluies (P-value = 0.001) à l'horizon 2099. Enfin, le modèle CanESM2 projette une baisse significative de la pluie sur toute la période 2006 à 2099 (P-value < 0.05).

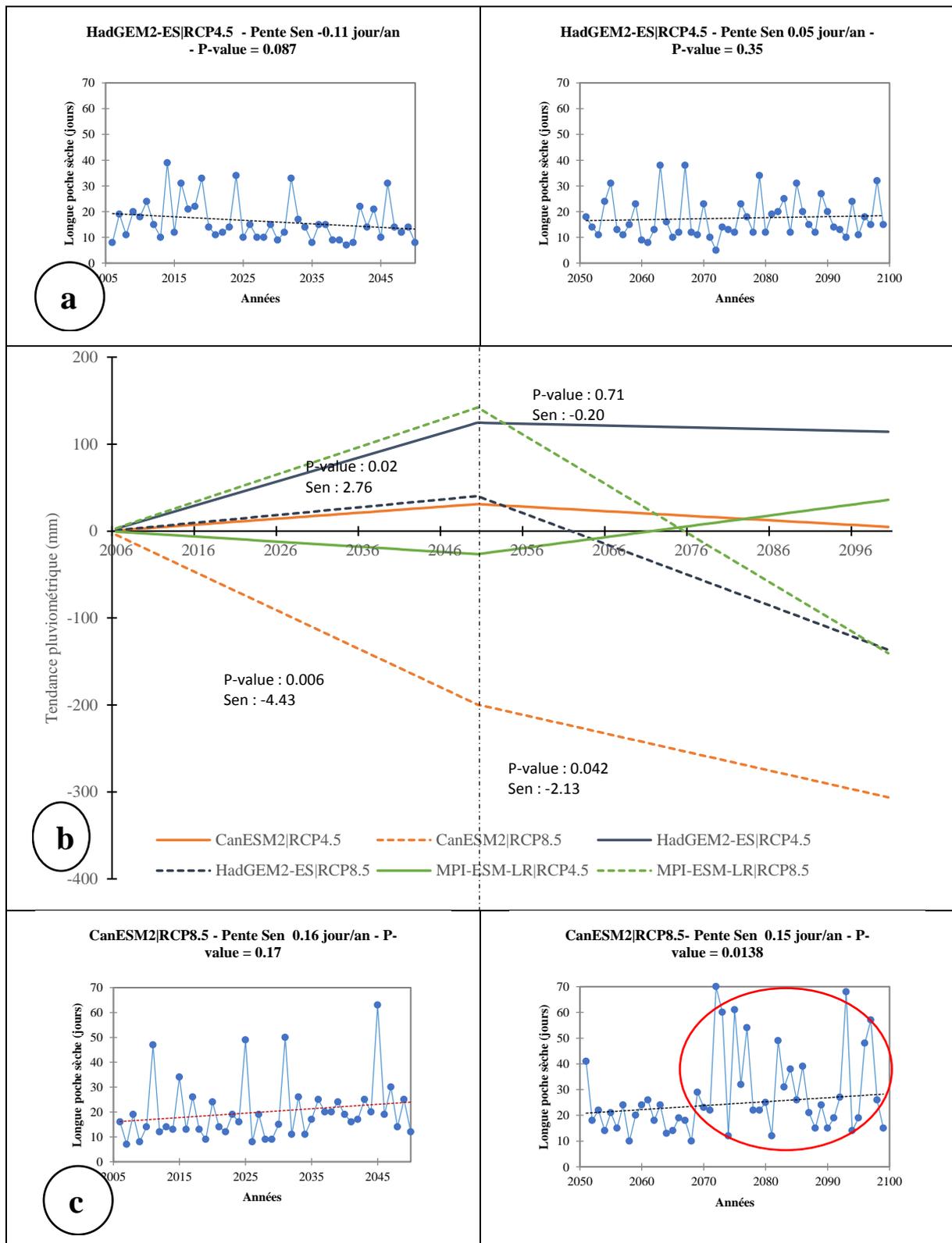


Figure 6-4 : Tendence des précipitations annuelles (b) et des longues poches sèches par saison (a et c) projetées par les modèles. Le modèle CanESM2|RCP8.5 montre une augmentation des longues poches sèches pluviométriques à partir des années 2070 avec un arrêt précoce des pluies très souvent à partir du mois d'août.

Une divergence des tendances de précipitations futures est mise en évidence (tendance à la diminution et à l'augmentation) par les modèles aux horizons 2050 quel que soit le scénario d'émission considéré (RCP4.5 ou RCP8.5). La baisse des précipitations est globalement significative pour tous les modèles sur la période 2051 à 2099 sous RCP8.5. Ces projections montrent qu'à l'horizon 2099, les précipitations pourraient connaître une baisse significative si le scénario RCP8.5 s'avère réaliste. D'une manière générale, les tendances projetées vont d'une augmentation des précipitations à l'horizon 2050 à une stabilisation des pluies jusqu'à l'horizon 2099 (HadGEM2-ES|RCP4.5) ou soit d'une diminution continue des pluies jusqu'à l'horizon 2099 (CanESM2|RCP8.5). Pour la suite de cette étude, nous retiendrons les scénarios climatiques projetés par les modèles HadGEM2-ES|RCP4.5 et CanESM2|RCP8.5 car ils constituent les tendances les plus extrêmes observées.

La comparaison du changement de comportement des précipitations entre les périodes futures et la période des observations a montré une forte incertitude. En effet, par rapport aux observations, la fluctuation des précipitations moyennes annuelles se situerait entre -40% et +2% d'ici à 2099. Ces résultats corroborent ceux de Aziz et Obuobie, (2017) qui ont trouvé une variation des précipitations comprise entre -33% et +2% pour l'horizon 2100 dans la zone nord-ouest du Burkina Faso.

Tableau 6-2 : Résultats du test de Mann-Kendall sur la série de précipitations et de longues poches sèches mettant en évidence la pente de Sen et la P-value pour les scénarii d'émission RCP4.5 et RCP8.5

Scénarios	Périodes	Modèles	Précipitations		Longues poches sèches	
			Pente de Sen	P-value	Pente de Sen	P-value
RCP4.5	2006-2050	CanESM2	0.69	0.36	0.00	0.91
		HadGEM2-ES	2.76	0.027*	-0.11	0.09
		MPI-ESM-LR	-0.58	0.67	0.00	0.78
	2051-2099	CanESM2	-0.52	0.23	0.00	0.92
		HadGEM2-ES	-0.20	0.71	0.05	0.35
		MPI-ESM-LR	1.24	0.21	0.00	0.72
RCP8.5	2006-2050	CanESM2	-4.43	0.006*	0.16	0.05
		HadGEM2-ES	0.89	0.49	-0.09	0.34
		MPI-ESM-LR	3.16	0.02*	-0.10	0.71
	2051-2099	CanESM2	-2.13	0.04*	0.15	0.14
		HadGEM2-ES	-3.53	0.002*	0.36	0.00*
		MPI-ESM-LR	-5.65	0.001*	0.27	0.001*

***Tendance significative à un seuil de 5%**

Une comparaison est faite entre les tendances des pluies annuelles et les tendances des longues poches sèches projetées à la **Figure 6-4**. Il ressort que la tendance des précipitations à l'augmentation à l'horizon 2050 sera accompagnée d'une tendance à la diminution des longues poches sèches qui évolueront de 20 jours à 14 jours en moyenne. La baisse non significative des pluies de 2051 à 2099 montre une stabilité des longues poches sèches saisonnières à 16 jours (HadGEM2-ES|RCP4.5). Par contre, le cas de la baisse continue des pluies jusqu'à l'horizon 2099 sera suivi d'une hausse continue des longues poches sèches qui pourrait évoluer de 15 à 25 jours en moyenne. Cette tendance à l'augmentation des longues poches sèches pluviométriques sera accentuée dans tous les cas à partir des années 2070 et serait liée à un arrêt précoce des pluies très souvent à partir du mois d'août, ce qui pourrait engendrer des déficits hydriques importants pour les cultures (CanESM2|RCP8.5).

Ainsi, comparativement à la période des observations (1961-2005) les changements de caractéristiques pluviométriques sont les suivants :

Scénario 1 H2050 : Une augmentation des précipitations de 10% et une diminution des longues poches sèches de 6% à l'horizon 2050 (2006-2050) soit une tendance à la baisse des longues poches sèches de 20 jours à 14 jours.

Scénario 1 H2100 : Une augmentation des précipitations de 2% et une baisse des longues poches sèches de 6% à l'horizon 2099 (2051-2099) soit une stabilisation des longues poches sèches saisonnières à 16 jours.

Scénario 2 H2050 : Une diminution des précipitations de 23 % et une augmentation des longues poches sèches de 25% à l'horizon 2050 (2006-2050) soit une tendance à la hausse des longues poches sèches de 15 jours à 20 jours.

Scénario 2 H2100 : Une diminution des précipitations de 40% et une augmentation des longues poches sèches de 75% à l'horizon 2099 (2051-2099) soit une tendance à la hausse des longues poches sèches qui pourrait évoluer de 15 à 25 jours.

3.5. Analyse de l'évapotranspiration projetée

La **Figure 6-5** présente la dispersion de l'évapotranspiration moyenne mensuelle observée durant la période 1961 à 2005 avec l'évapotranspiration moyenne mensuelle projetée à l'horizon 2099 des scénarios HadGEM2-ES|RCP4.5 « standard » et CanESM2|RCP8.5 « pessimiste ».

Les valeurs de l'ET0 connaîtront une augmentation dans le futur comparativement à la période des observations. En effet, l'ET0 moyenne mensuelle a varié entre 135 et 210 mm pendant la période historique. Elle évoluera entre 152 et 215 mm sous le scénario « standard » et de 165 à 220 mm sous le scénario « pessimiste ». En moyenne l'ET0 moyenne mensuelle sera de 177 mm et 192 mm respectivement sous le scénario « standard » et « pessimiste ». En moyenne, on projette une augmentation de l'ET0 à l'horizon 2099 par rapport à la période historique de l'ordre de +2% et 11% respectivement pour les scénarios « standard » et « pessimiste ». Sous le scénario « pessimiste » les besoins en eau de la plante seront très importants comparativement à la période des observations.

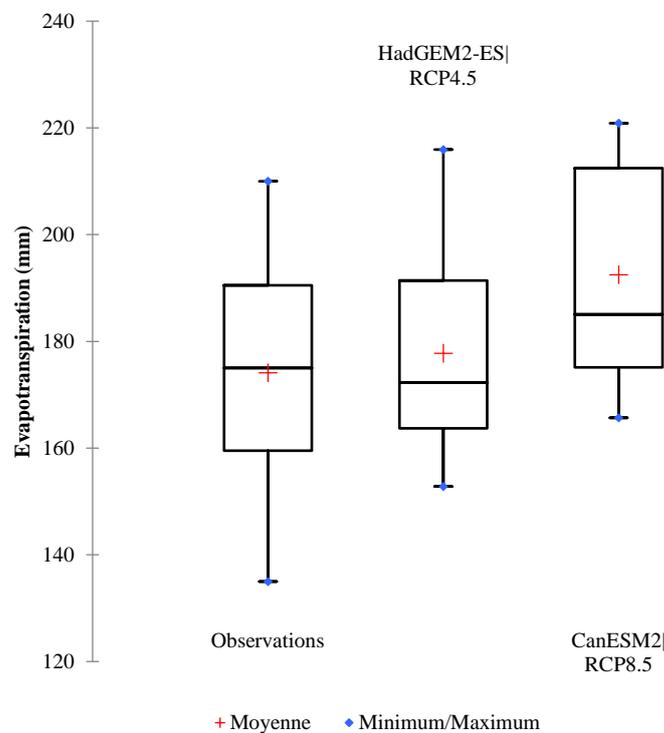


Figure 6-5 : Comparaison de l'évapotranspiration moyenne mensuelle historique durant la période 1961-2005 avec l'évapotranspiration moyenne mensuelle projetée à l'horizon 2099

L'augmentation de l'évapotranspiration sur la période future est associée à la hausse continue de la température en accord avec l' IPCC (2013). Les études de Aziz et Obuobie (2017) au Burkina Faso ont projeté une augmentation moyenne de la température de 2.2 à 2.6°C selon le scénario RCP4.5 et de 3.5 à 3.7°C selon le scénario RCP8.5 à l'horizon 2100.

3.6. Performance du zaï face au climat futur

La **Figure 6-6** présente le taux de satisfaction hydrique du zaï d'après le scénario « standard » HadGEM2-ES|RCP4.5 et le scénario « pessimiste » CanESM2|RCP8.5 aux horizons 2050 et 2099. Une comparaison est faite avec le taux de satisfaction hydrique obtenu avec le zaï de 40 cm de diamètre sur la période des observations (1961-2005).

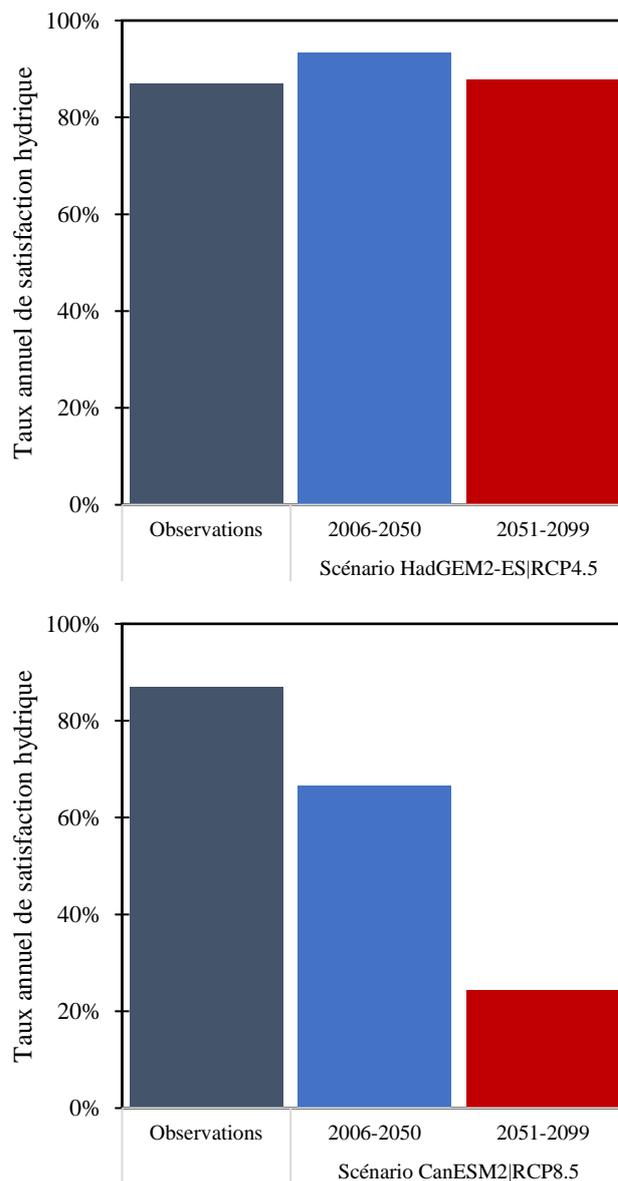


Figure 6-6: Taux de satisfaction hydrique du zaï de 40 cm de diamètre pour le scénario HadGEM2-ES|RCP4.5 et le scénario CanESM2|RCP8.5 à l'horizon 2050 et 2099. La comparaison est faite avec le taux de satisfaction hydrique observé de 1961 à 2005.

Sur la période historique (1961-2005), le taux de satisfaction hydrique du zaï optimisé a été estimé de l'ordre de 87%, soit une satisfaction hydrique assurée 9 années sur 10. Sur la période historique les longues poches sèches ont duré en moyenne 16 jours. Pour appréhender les effets

du changement climatique sur les performances du zaï, quatre scénarios reflétant divers degrés de changement des caractéristiques pluviométriques sont présentés ci-dessous :

Scénario 1 H2050 : Une augmentation des précipitations de **10%** et une diminution des longues poches sèches de **6%** à l'horizon 2050 (2006-2050) par rapport à la période historique pourraient occasionnées une satisfaction hydrique du zaï de l'ordre de 93% soit **9 chances sur 10** années d'assurer une récolte acceptable à la fin de la saison.

Scénario 1 H2100 : Une augmentation des précipitations de **2%** et une baisse des longues poches sèches de **6%** à l'horizon 2099 (2051-2099) comparativement à la période historique pourraient occasionnées une satisfaction hydrique du zaï de l'ordre de 88% soit l'assurance d'une récolte **9 années sur 10**.

Scénario 2 H2050 : Une diminution des précipitations de **23 %** et une augmentation des longues poches sèches de **25%** à l'horizon 2050 (2006-2050) par rapport à la période historique pourraient occasionnées une satisfaction du zaï de l'ordre de 67% soit **7 chances sur 10** années d'assurer une récolte adéquate à la fin de la saison.

Scénario 2 H2100 : Une diminution des précipitations de **40%** et une augmentation des longues poches sèches de **75%** à l'horizon 2099 (2051-2099) comparativement à la période historique pourraient occasionnées une satisfaction du zaï de l'ordre de 25% soit une récolte assurée **3 années sur 10**.

Selon les scénarios climatiques, les impacts du climat futur sur les performances hydrologiques du zaï peuvent être très différents. Ces différences de performance projetées peuvent s'expliquer par les différences de caractéristiques climatiques. Primo, le taux de satisfaction hydrique est suffisant pour le scénario 1. Le taux de satisfaction hydrique est supérieur à 93% à l'horizon 2050 du fait de la tendance à l'augmentation des précipitations et de la tendance à la diminution des longues poches sèches. La baisse non significative des pluies entre 2051 à 2099 a maintenu une satisfaction hydrique du zaï également suffisante de l'ordre de 88% des années. Secundo, le taux de satisfaction hydrique est insuffisant pour le scénario 2. Ce taux de satisfaction hydrique est de l'ordre de 67% à l'horizon 2050 et 25% à l'horizon 2099. Ceci s'expliquerait par la baisse continue des pluies jusqu'à l'horizon 2099, l'occurrence d'une reprise d'évapotranspiration plus importante (30% supérieure au scénario 1 H2050) suivie d'une hausse continue des longues poches sèches qui pourraient évoluées de 20 à 60 jours avec de fins précoces de saisons à partir des années 2070.

On note que sous le scénario 2, les conditions climatiques impacteront les performances hydrologiques de la technique du zaï avec des sévérités plus importantes que celles observées sous le scénario 1. En effet, les déficits hydriques seront plus importants avec le scénario 2 comparativement au scénario 1. Ainsi, le déficit hydrique moyen à l'horizon 2099 est estimé sur le zaï à 40 mm soit 20% des besoins en eau du mil. Ce scénario prédit que même avec des variétés à cycle court, même avec des techniques culturales à priori efficaces, on s'exposera à des famines plus fréquentes, une baisse des revenus importantes.

La longueur moyenne des plus longues sécheresses pluviométrique pourrait atteindre 24 jours aux horizons futurs. A l'horizon 2099, l'augmentation importante de la demande en eau des plantes pourra ramener à seulement 10 jours la durée pendant laquelle le zaï est capable de subvenir aux besoins en eau des plantes sans précipitation (contre 21 jours pour la période 1961-2005). Cette baisse du seuil de poche sèche pourrait être due à des reprises importantes d'eau par évapotranspiration et à l'augmentation de la longueur des poches sèches comparativement à la période historique. La **Figure 6-7** montre le seuil de poche sèche pouvant assécher le stock d'eau du sol et par conséquent engendrer un déficit hydrique sur la période historique et la période future sous le scénario 2. Cependant, une autre préoccupation majeure pourrait venir de ces tendances à l'augmentation des longues poches sèches pluviométriques pouvant aller au-delà de 2 mois à partir des années 2070. Cette situation serait liée à un arrêt précoce des pluies très souvent à partir du mois d'août, ce qui empêcherait le développement des plantes.

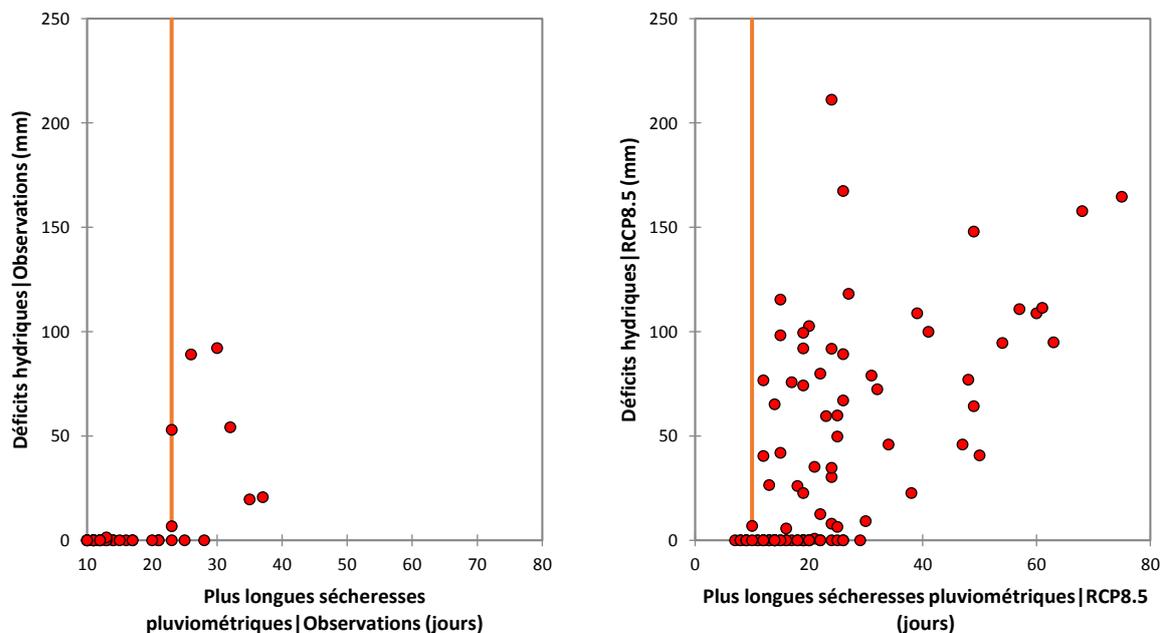


Figure 6-7: Seuil de la poche sèche pluviométrique susceptible de générer un déficit hydrique du sol
A gauche le seuil correspondant à la période historique et à droite le seuil correspondant à la période future sous RCP8.5

Les projections climatiques utilisées dans cette étude ont montré des incertitudes sur les caractéristiques climatiques observées. Les résultats ont montré néanmoins la capacité de certains modèles climatiques à reproduire les structures des précipitations moyennes mensuelles, l'occurrence des poches sèches et de l'ET0 moyenne mensuelle observée suggérant ainsi que les données issues de ces modèles sont adéquates pour étudier les performances hydrologiques des techniques par rapport au climat futur. L'utilisation des techniques de zaï sous conditions climatiques projetées serait d'autant moins performante que les poches de sécheresse seront de plus en plus importantes avec de fortes demandes en eau des plantes. De même, les performances hydrologiques du zaï baisseraient drastiquement à long terme.

En effet, il ressort de cette étude que sous le climat futur, les reprises d'évapotranspiration augmenteront et on pourrait avoir des fortes incertitudes sur les cumuls de pluie, l'occurrence de longues sécheresses et la durée des saisons pluvieuses (IPCC, 2013; Aziz and Obuobie, 2017). Cependant, les techniques de zaï proposées sembleraient être en mesure d'atténuer les sécheresses pluviométriques d'ici à l'horizon 2050 avec un taux de satisfaction hydrique de 67%, soit 7 chances sur 10 années d'assurer une récolte adéquate à la fin de la saison. En rappel, le zaï permet d'atténuer les effets négatifs de la variabilité pluviométrique inter-saisonnière en assurant une augmentation importante de la capacité de stockage en eau du sol pour faire face aux période de sécheresse (Jasmin et al., 2015; Mupangwa et al., 2016; Zouré et al., 2019). Toutefois, durant la période 2051-2099, le zaï proposé pourrait s'avérer limiter pour soutenir la production agricole, car les chances de récoltes sont estimées à 3 années sur 10. Ainsi, les pertes probables de productions agricoles entraîneront des dommages socio-économiques tels que la pauvreté, la famine, les conflits et la migration.

Au regard de cette situation dramatique envisagée, nous préconisons les stratégies d'adaptation suivantes pour faire face aux effets néfastes du changement climatique :

- L'adoption de techniques d'irrigation d'appoint au moyen des bassins de rétention des eaux de ruissellement et de puits creusés à proximité des champs, où les apports en eau et les périodes d'arrosage sont contrôlés par l'exploitant agricole.
- L'adoption de variétés culturales adaptées à la zone sahélienne, tolérante à la sécheresse et à cycles relativement courts.
- Prospection de la possibilité d'introduction de nouvelles variétés de culture plus adaptée aux conditions climatiques futures à travers la recherche scientifique.

- Mise à disposition de l'accès à l'information climatique pour une meilleure planification des campagnes agricoles. La prédiction des caractéristiques de la saison hivernale (démarrage, longueur et fin de la campagne agricole, tendance globale de la pluviométrie) permettrait aux acteurs agricoles d'intégrer le risque climatique dans leur prise de décision.

4. Conclusion partielle

Le climat futur sera probablement caractérisé par d'importantes reprises d'évapotranspiration, d'une incertitude sur les cumuls pluviométriques, d'une forte occurrence des longues poches sèches pluviométriques et à long terme d'un raccourcissement de la saison des pluies. Ces changements du climat futur affecteront les stocks d'eau du sol et conduiront à des déficits hydriques significatifs pour les plantes avec des conséquences sur les productions agricoles. Ainsi, les changements projetés avec le scénario « pessimiste » occasionneraient des déficits hydriques plus importants comparativement aux déficits engendrés avec le scénario « standard ».

Le zaï de diamètre 40 cm, espacement 80x80 cm, profondeur 10 cm aurait été en mesure d'assurer la satisfaction hydrique des plants sur la période des observations à hauteur de 9 années sur 10. Dans le cas pessimiste, cette performance serait de 7 années sur 10 à l'horizon 2050 et seulement de 3 années sur 10 durant la période 2050 à 2100. Cela s'explique par les extrêmes climatiques projetés par les modèles se caractérisant l'occurrence des longues poches sèches et le raccourcissement des saisons pluvieuses. Des mesures d'adaptation plus importantes autres que les techniques CES devront être mises en place pour permettre aux producteurs agricoles d'être plus résilients face aux changements climatiques.

Cette étude a permis de mettre à disposition des groupements paysans et des acteurs du développement agricole des informations importantes quant à la performance des techniques de zaï à atténuer les effets négatifs du changement climatique futur. Elle permettra une meilleure prise de décision dans la planification des campagnes agricoles au Sahel.

Conclusion générale et perspectives

Au Sahel, la péjoration climatique associée à la dégradation des terres entraîne une diminution de la capacité de rétention en eau des sols d'où la faible satisfaction en eau des cultures. Cependant les techniques innovantes dites de conservation des eaux et des sols adoptées par les paysans Sahéliens, constituent des moyens efficaces pour atténuer les impacts des sécheresses fréquentes et extrêmes afin d'assurer une production agricole durable et adéquate.

Cette étude développée dans le cadre du programme de recherche 3^E « Eau – Environnement – Énergie », a eu pour objectif principal d'évaluer les performances hydrologiques des techniques CES sous climat actuel et futur. Plus spécifiquement, il s'est agi d'étudier les performances hydrologiques de 3 techniques CES et de comparer leurs efficacités avec la technique de semis direct à la daba, d'étudier la résilience des techniques CES faces à la variabilité climatique et enfin d'identifier des techniques plus efficaces en relation avec le climat passé et futur. Partant de ces objectifs, cette étude a permis d'améliorer la compréhension des performances hydrologiques des techniques CES et de proposer aux paysans des techniques plus résilientes face aux variabilités climatiques.

Les trois années de suivi hydrologique sur les parcelles expérimentales ont démontré les potentiels de réduction du ruissellement et d'amélioration du stockage en eau du sol par les techniques CES, en particulier le zaï et la demi-lune. Ces performances sont induites par la capacité de collecte des eaux de pluie en surface et par la modification des propriétés hydrauliques de surface du sol. Ainsi, le ruissellement est réduit de 25 %, 55% et 95% par le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune comparativement à la technique de semis direct. Le zaï et la demi-lune présentent les plus fortes valeurs d'humidité du sol comprises entre 15-25%. Les meilleures conditions de collecte et d'infiltration de l'eau induite par l'implémentation des techniques CES ont favorisé une évolution de l'humidité en dessous de la zone racinaire du mil. Ces techniques agricoles permettent d'assurer une disponibilité constante de l'eau pour la culture, ce qui apparaît comme une condition préalable à l'obtention de meilleurs rendements agricoles. Les meilleures productions agricoles sont également dues à la capacité des techniques CES à améliorer les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol. Les rendements agricoles se trouvent ainsi améliorés d'un facteur de 6 à 10 par rapport au semis direct.

Le modèle hydrologique proposé a permis de simuler le ruissellement observé sur les différentes techniques agricoles et sous différents régimes pluviométriques. Il a également permis de fournir une évaluation de la dynamique du stock d'eau dans le sol, qui s'avère très différente entre les types de techniques, mais aussi fortement conditionnée par la distribution des précipitations pendant la saison de culture. Le zaï et la demi-lune ont pu satisfaire les besoins en eau des cultures durant 2 à 3 semaines pendant les longues périodes de sécheresse pluviométrique, tandis que les cordons pierreux et les semis directs ont connu plusieurs jours de sécheresses agronomiques entraînant des déficits hydriques importants à la fin des saisons.

L'application du modèle hydrologique sous climat observé a permis d'extrapoler les performances hydrologiques des techniques agricoles sur le long terme. Cette analyse sur 49 années d'observations (1961 à 2009) a permis de soutenir la performance des techniques de zaï et de demi-lune à faire face à des poches sèches pluviométriques de 2 à 3 semaines. Cette performance du zaï et de la demi-lune à contenir les besoins en eau du mil est démontrée par leurs capacités à stocker plus d'eau afin de prolonger la durée de la poche sèche pluviométrique pouvant tarir le stock d'eau du sol. Ces techniques sont mieux indiquées pour l'agriculture en milieu sahélien, cependant la demi-lune nécessiterait des études supplémentaires car en plus de favoriser le colmatage, elle serait sujette à une perte d'eau importante par évaporation.

Sur la base du climat observé, il ressort que le zaï de diamètre 40 cm, espacements 80x80 cm, profondeur 10 cm et le zaï de diamètre 30 cm, espacements 100x60 cm de profondeur 16 cm auraient permis d'assurer les besoins hydriques du mil 9 années sur 10 tout en assurant une production agricole satisfaisante. Ces dimensions sont proches de celles pratiquées dans la région. À l'avenir, le zaï proposé semble être en mesure d'atténuer les sécheresses pluviométriques d'ici à l'horizon 2050 avec une assurance de production acceptable à la fin de la saison de 7 années sur 10. Toutefois, durant la période 2051-2099, le zaï proposé ne serait plus suffisant pour soutenir la production agricole car les chances d'une satisfaction hydrique des plants sont estimées à 3 années sur 10. Des techniques agricoles plus importantes devront être mises en place pour permettre aux producteurs agricoles d'être plus résilients face aux changements climatiques.

Les perspectives à envisager pour cette thèse outre la continuité des observations peuvent se résumer comme suit :

Une étude plus fine doit être menée sur la distribution spatiale des types de croutes induites par les techniques de zaï et de demi-lune à la surface du sol. En effet, cette étude a permis

d'appréhender l'aptitude des techniques à booster les rendements agricoles durant les premières années d'installation, toutefois avec des risques de colmatage observés dans la demi-lune. La technique de demi-lune modifie des propriétés hydrauliques du sol par un dépôt d'éléments fins à la surface du sol réduisant ainsi l'infiltration de l'eau dans le sol. Ces observations pourraient être liées aux effets combinés de la taille des cuvettes, du type de sol et de la pluviométrie. C'est pourquoi les études prochaines devront investiguer plus en détail les impacts hydrologiques liés aux types de sols, aux comportements pluviométriques et aux caractéristiques géométriques des techniques agricoles. Une proposition serait, la simulation de l'infiltration dans la demi-lune avec un modèle tridimensionnel en intégrant l'écoulement de surface pour obtenir à l'avenir des informations sur l'optimisation de la conception des demi-lunes en termes de dimensions caractéristiques et de densité de plants qui permettraient d'éviter les inondations et de favoriser le drainage de l'eau dans le sol.

Des études de terrain et de modélisation doivent être menées pour déterminer les performances hydrologiques de l'association des différentes techniques de conservation des eaux et des sols. Cette pratique est recommandée de plus en plus par plusieurs auteurs et acteurs de développement dans le but d'améliorer davantage les performances agronomiques des techniques CES. C'est ainsi, que l'on peut rencontrer dans certaines localités des technologies où sont pratiqués à la fois le cordon pierreux et le zaï ou encore les cordons pierreux et les demi-lunes. Malheureusement, il y'a une insuffisance de documents y afférent.

Le modèle hydrologique développé peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision pour évaluer la performance hydrologique d'un type de pratique agricole sous différents régimes climatiques et d'état de surface à condition de déterminer les paramètres sensibles du modèle qui sont la capacité maximale de stockage liée au type de sol et l'abstraction initiale liée à la configuration géométrique de la technique agricole.

Améliorer le modèle hydrologique SCS-CN développé en le couplant avec un modèle agronomique utilisable à l'échelle du bassin versant. L'utilisation d'un tel modèle permettra de prendre en compte les effets d'occupation du sol, de la topographie et de la pédologie sur la réponse hydrologique du bassin versant et d'évaluer la production agricole sous différents climat. Le modèle pourrait ainsi être un outil d'aide à la décision politique pour les aménagements intégrés des bassins versants sahéliens.

Etudier la performance des techniques à prolonger la longueur de la campagne agricole. En effet, les dates de début et de fin de campagnes sont des indicateurs de bonnes ou de mauvaises

saisons agricoles. Des projections climatiques prédisent des débuts tardifs et des fins précoces des saisons agricoles. La question est de savoir s'il est possible avec les techniques de zaï et de demi-lune de semer plus tôt et d'assurer la réussite d'une campagne agricole. Est-ce que les pluies isolées en début de saison pluvieuse, souvent qualifiée de faux départ de campagne du fait de leur volume important pourraient servir de débuts de campagne pour les utilisateurs de techniques de zaï et de demi-lune quand on sait la capacité de ces techniques à limiter les effets néfastes des poches sèches pluviométriques de 2 à 3 semaines.

L'utilisation des bassins de rétention et des systèmes d'irrigation en association avec les techniques de zaï pourrait être une solution pour faire face aux faux départs des campagnes et aux longues poches sèches survenant durant la saison pluvieuse et pouvant être à l'origine des fins précoces de campagne. Ainsi, l'association des technologies bassin de rétention et zaï pourrait être utilisée pour allonger la durée de la campagne agricole et donner plus de chance de récolter à la fin de la campagne.

Références bibliographiques

- 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. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 19, 270–280.
- Africare, Inera, 2014a. Fiche d'information : Les cordons pierreux.
- Africare, Inera, 2014b. Fiche d'information : Le Zaï amélioré.
- Africare, Inera, 2014c. Fiche d'information : La microdose.
- Afrique Verte International, 2004. *L'agriculture au Sahel.*
- AFSA, 2015. Alliance for Food Sovereignty in Africa (AFSA). *Soil Water Conservation Techniques in Burkina Faso.*
- Ahuja, L., Fiedler, F., Dunn, G., Benjamin, J., Garrison, A., 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1228–1233.
- Akinsanola, A., Ajayi, V., Adejare, A., Adeyeri, O., Gbode, I., Ogunjobi, K., Nikulin, G., Abolude, A.T., 2018. Evaluation of rainfall simulations over West Africa in dynamically downscaled CMIP5 global circulation models. *Theor. Appl. Climatol.* 132, 437–450. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2087-8>
- Albergel, J., 1987. Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface: application aux petits bassins du Burkina Faso. *Influ. Clim. Change Clim. Var. Hydrol. Regime Water Resour.* 168, 355–365.
- Alhassane, A., Salack, S., Ly, M., Lona, I., Traoré, S.B., Sarr, B., 2013. Evolution of agro-climatic risks related to the recent trends of the rainfall regime over the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Sécheresse* 282–293. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0400>
- Ali, A., Lebel, T., 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatol.* 29, 1705–1714.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and drainage paper No. 56).* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Allmaras, R., Burwell, R., Holt, R., 1967. Plow-Layer Porosity and Surface Roughness from Tillage as Affected by Initial Porosity and Soil Moisture at Tillage Time 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 31, 550–556.
- Ambouta, J.-M.K., Valentin, C., Laverdière, M.R., 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sci. Chang. Planétaires* Sécheresse 7, 269–275.
- Amogu, O., 2009. *La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger : méthodes expérimentales et modélisation.* Université Joseph Fourier, France.
- Andrews, D., Rajewski, J., Kumar, K., 1993. *Pearl millet: New feed grain crop.* New Crops Wiley Press N. Y. 198–208.
- Araya, A., Stroosnijder, L., 2010. Effects of tied ridges and mulch on barley (*Hordeum vulgare*) rainwater use efficiency and production in Northern Ethiopia. *Agric. Water Manag.* 97, 841–847.
- Araya, T., Nyssen, J., Govaerts, B., Deckers, J., Cornelis, W.M., 2015. Impacts of conservation agriculture-based farming systems on optimizing seasonal rainfall partitioning and productivity on vertisols in the Ethiopian drylands. *Soil Tillage Res.* 148, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.11.009>
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R., 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *J. Hydraul. Eng.* 121, 171–183.

- Assefa, S., Biazin, B., Muluneh, A., Yimer, F., Hailelassie, A., 2016. Rainwater harvesting for supplemental irrigation of onions in the southern dry lands of Ethiopia. *Agric. Water Manag.* 178, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.012>
- Aziz, F., Obuobie, E., 2017. Trend analysis in observed and projected precipitation and mean temperature over the Black Volta Basin, West Africa. *Int. J. Curr. Eng. Technol.* 7, 1400–1412.
- BAD, 2013. La BAD et le secteur agricole au Sahel : des investissements de plus de 1 milliard de dollars bénéficiant à 2 millions de paysans et éleveurs [WWW Document]. Afr. Dev. Bank Group. URL <https://www.afdb.org/en/news-and-events/la-bad-et-le-secteur-agricole-au-sahel-des-investissements-de-plus-de-1-milliard-de-dollars-beneficiant-a-2-millions-de-paysans-et-eleveurs-12494/>
- Bambara, D., Bilgo, A., Lompo, F., Hien, V., 2012a. Influence du changement climatique sur la diversité inter et intra-spécifique des plantes cultivées à Tougou au nord du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.21>
- Bambara, D., Bilgo, A., Traoré, H., Lompo, F., Thiombiano, A., Hien, V., 2012b. Evaluation des effets des aménagements du zaï et des diguettes de longue durée sur la productivité céréalière au nord du Burkina Faso. *Bull. Rech. Agron. Bénin BRAB* 13–25.
- Bambara, D., Compaoré, H., Bilgo, A., 2018. Évolution des températures au Burkina Faso entre 1956 et 2015: cas de Ouagadougou et de Ouahigouya. *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 23–41.
- Bambara, D., Thiombiano, A., Hien, V., 2016. Changements climatiques en zones nord-soudanienne et sub-sahélienne du Burkina Faso: comparaison entre savoirs paysans et connaissances scientifiques.
- Banque mondiale, 2017. Agriculture, valeur ajoutée (% du PIB) [WWW Document]. URL <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.AGR.TOTL.ZS>
- 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. *Environ. Manage.* 43, 790–803. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9237-9>
- Barké, K., Salifou, M., 2015. Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le Sud-Est du Niger. *Publ. Assoc. Int. Climatol.* 28, 537–542.
- Barrow, C.J., 2014. *Alternative irrigation: the promise of runoff agriculture*. Routledge.
- Barry, B., Olaleye, A.O., Zougmore, R., Fatondji, D., 2009. Rainwater harvesting technologies in the Sahelian zone of West Africa and the potential for outscaling. IWMI.
- Bayala, J., Kalinganire, A., Tchoundjeu, Z., Sinclair, F., Garrity, D., others, 2011. Conservation agriculture with trees in the West African Sahel—a review. *ICRAF Occas. Pap.* 14.
- Beck, M.B., 1987. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. *Water Resour. Res.* 23, 1393–1442.
- Bélair, G., Dauphinais, N., Fournier, Y., Dangi, O., Clément, M., 2005. Effect of forage and grain pearl millet on *Pratylenchus penetrans* and potato yields in Quebec. *J. Nematol.* 37, 78.
- Bezdicek, D., Beaver, T., Granatstein, D., 2003. Subsoil ridge tillage and lime effects on soil microbial activity, soil pH, erosion, and wheat and pea yield in the Pacific Northwest, USA. *Soil Tillage Res.* 74, 55–63.
- Biazin, B., Sterk, G., Temesgen, M., Abdulkedir, A., Stroosnijder, L., 2012. Rainwater harvesting and management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa – A review. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 47-48, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.015>
- Bielders, C., Baveye, P., Wilding, L., Drees, L., Valentin, C., 1996. Tillage-induced spatial distribution of surface crusts on a sandy Paleustult from Togo. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 843–855.

- Bliefert, C., Perraud, R., 2008. Chimie de l'environnement: air, eau, sols, déchets, 2. De Boeck Supérieur.
- Boiffin, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Inst. Natl. Agron. Paris Grignon.
- Botoni, E., Reij, C., 2009. La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel: Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles. Ouagadougou Burkina Faso Amst. Neth. Com. Perm. Inter Etats Pour Lutte Contre Sécher. Au Sahel Vrije Univ. Amst.
- Bui, Y.T., Orange, D., Visser, S.M., Hoanh, C.T., Laissus, M., Poortinga, A., Tran, D.T., Stroosnijder, L., 2013. Lumped surface and sub-surface runoff for erosion modeling within a small hilly watershed in northern Vietnam: LUMPED SURFACE AND SUB-SURFACE RUNOFF FOR EROSION MODELING. *Hydrol. Process.* n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/hyp.9860>
- BUNASOL, 2004. Etudes morpho-pédologique des provinces du Yatenga, du Loroum et du Zondoma (Région du NORD: Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des ressources halieutiques).
- BUNASOLS, 2015. Caractérisation des sols du site de Tougou. Bureau National des Sols, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Camara, M., Diedhiou, A., Sow, B.A., Diallo, M.D., Diatta, S., Mbaye, I., Diallo, I., 2013. Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest. *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse* 24, 14–28.
- Casenave, A., 1991. Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface. Eds AUPELF–UREF John Libbey Eurotext Paris, Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. 77–86.
- Casenave, A., Valentin, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration, Editions de l'ORSTOM. ed, Collections Didactiques. Paris, France.
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., Voltz, M., 2006. Accounting for temporal variation in soil hydrological properties when simulating surface runoff on tilled plots. *J. Hydrol.* 326, 135–152.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I., Domingo, F., 2012. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil Biol. Biochem.* 49, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.017>
- Charlier, J.-B., 2007. Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu volcanique tropical. Montpellier II, France.
- Charlier, J.-B., Moussa, R., Cattan, P., Cabidoche, Y.-M., Voltz, M., 2009. Modelling runoff at the plot scale taking into account rainfall partitioning by vegetation: application to stemflow of banana (*Musa spp.*) plant. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 13, 2151–2168.
- CILSS, 2018. Cadre Harmonisé d'analyse et d'identification des zones à risque et des populations en insécurité alimentaire et nutritionnelle au Sahel et en Afrique de l'Ouest (CH) – Analyse régionale de la situation de l'insécurité alimentaire et nutritionnelle aiguë – Situation courante (mars-mai 2018) et projetée (Juin-Août 2018).
- Claude, J., Grouzis, M., Milleville, P., 1991. Un espace sahélien: la mare d'Oursi, Burkina Faso. IRD Editions.
- Cook, J., Oreskes, N., Doran, P.T., Anderegg, W.R., Verheggen, B., Maibach, E.W., Carlton, J.S., Lewandowsky, S., Skuce, A.G., Green, S.A., others, 2016. Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environ. Res. Lett.* 11, 048002.
- CountryStat, 2013. Food and agriculture data network [WWW Document]. URL <http://www.countrystat.org/home.aspx?c=bfa>

- Daamen, C.C., Simmonds, L., Sivakumar, M., 1995. The impact of sparse millet crops on evaporation from soil in semi-arid Niger. *Agric. Water Manag.* 27, 225–242.
- Da, C.É.D., 2008. Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur le rendement du sorgho au centre-nord du Burkina Faso. *Cah. D'Outre-Mer* 61, 99–110. <https://doi.org/10.4000/com.3512>
- Danjuma, M., Mohammed, S., 2015. Zai pits system: a catalyst for restoration in the dry lands. *J. Agric. Vet. Sci.* 8, 1–4.
- Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application...* Victor Dalmont.
- Delestre, O., Cordier, S., Darboux, F., Du, M., James, F., Laguerre, C., Lucas, C., Planchon, O., 2014. FullSWOF: A Software for Overland Flow Simulation, in: Gourbesville, P., Cunge, J., Caignaert, G. (Eds.), *Advances in Hydroinformatics*. Springer, Singapore, pp. 221–231.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Quantin, G., 2015. Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions: la Sénégalie et le Bassin du Niger Moyen. *Climatologie* 25–43.
- Descroix, L., Esteves, M., Souley Yéro, K., Rajot, J.-L., Malam Abdou, M., Boubkraoui, S., Lapetite, J., Dessay, N., Zin, I., Amogu, O., others, 2011. Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1569–1607.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *J. Hydrol.* 375, 90–102.
- Diello, P., 2007. *Interrelation climat-homme-environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique (SIBAGHE - Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences et Environnement)*. Sciences et Techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, France.
- Diuro, G., Birhanu, Z., Petri, M., Tabo, R., 2017. Adoption of soil and water conservation practices under different farming systems in the Sahel region of northern Mali. *InterDrought-V*.
- Djaman, K., Balde, A.B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneh, B., Moukoumbi, Y.D., Futakuchi, K., Saito, K., 2015. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 3, 139–159. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>
- Dörlochter-Sulser, S., Nill, D., 2012. *Good Practices in Soil and Water Conservation: A Contribution to Adaptation and Farmers' resilience Towards Climate Change in the Sahel*. GIZ.
- dos Santos, J.C.N., de Andrade, E.M., Guerreiro, M.J.S., Medeiros, P.H.A., de Queiroz Palácio, H.A., de Araújo Neto, J.R., 2016. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. *J. Hydrol.* 541, 1057–1066. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.016>
- Doto, V.C., 2016. *L'irrigation de complément à partir de petits bassins individuels en zone sahelienne Burkinabé : Impact sur la production des exploitations agricoles familiales*. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Duley, F., 1940. Surface Factors Affecting the Rate of Intake of Water by Soils 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 4, 60–64.
- Duponnois, R., Dia, A., 2013. *La grande muraille verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. IRD.

- Esteves, M., Faucher, X., Galle, S., Vauclin, M., 2000. Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values. *J. Hydrol.* 228, 265–282. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00155-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00155-4)
- FAO, 2012. Bonnes pratiques agricoles.
- Fatah, B., Mohamed, B., Abdelhamid, G., 2012. Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Nat. Technol.* 109.
- Fatondji, D., Martius, C., Zougmore, R., Vlek, P.L.G., Biolders, C.L., Koala, S., 2009. Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 85, 225. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9261-z>
- Fensholt, R., Rasmussen, K., 2011. Analysis of trends in the Sahelian “rain-use efficiency” using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sens. Environ.* 115, 438–451.
- Fiedler, F.R., Ramirez, J.A., 2000. A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 32, 219–239.
- Foglia, L., Hill, M.C., Mehl, S.W., Burlando, P., 2009. Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resour. Res.* 45.
- Fowe Tazen, 2015. Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne du Burkina Faso. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- Fox, P., Rockström, J., 2003. Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahel. *Agric. Water Manag.* 61, 29–50. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00008-8)
- Frappart, F., Hiernaux, P., Guichard, F., Mougin, E., Kergoat, L., Arjounin, M., Lavenu, F., Koité, M., Paturel, J.-E., Lebel, T., 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *J. Hydrol.* 375, 128–142.
- Gachon, P., Lepage, L., Vigeant, G., Cotnoir, A., Bokoye, A.I., Berteau, G., Poudret, P., 2007. Report on Canadian contributions to the CIDA-CILSS Project (A030978-002) “Climate Change Adaptation Capacity Support” (No. II). Environnement Canada, Montréal.
- Gerbaux, M., Hall, N., Dessay, N., Zin, I., 2009. The sensitivity of Sahelian runoff to climate change. *Hydrol. Sci. J.* 54, 5–16. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.5>
- Ghasemi, A., Zahediasl, S., 2012. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *Int. J. Endocrinol. Metab.* 10, 486.
- Giakoumakis, S., Stamouli, P., Tigka, D., 2015. Evaluating a modified simple rainfall-runoff model in Mediterranean river basins. *Eur. Water* 50, 35–42.
- Giannini, A., Biasutti, M., Held, I.M., Sobel, A.H., 2008. A global perspective on African climate. *Clim. Change* 90, 359–383.
- Govers, G., 2011. Misapplications and misconceptions of erosion models. *Handb. Eros. Model.* 117–134.
- Green, W.H., Ampt, G., 1911. Studies on Soil Physics. *J. Agric. Sci.* 4, 1–24.
- Griggs, D.J., Noguera, M., 2002. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- GTZ, 2007. Adaptations aux changements climatiques et lutte contre la désertification. OSS/GTZ, Note introductive n°1. Tunis, p. 28.
- Guengant, J.P., Banoin, M., Quesnel, A., 2003. Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: le cas du Niger. CICRED, Comité international de coopération dans les recherches nationales en démographie.

- Hadas, A., Frenkel, H., 1982. Infiltration as Affected by Long-term Use of Sodic-Saline Water for Irrigation 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 524–530.
- Hamadou, M., Idrissa, S., Mahamadou, C., Oumarou, S., Valentin, K., 2017. Potentialités fourragères du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br): *Revue de littérature. J. Anim. Plant Sci.* 34, 5424–5447.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Div.* 108, 225–230.
- Haverkamp, R., Ross, P., Smettem, K., Parlange, J., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 30, 2931–2935.
- Hernández, V., Phélinas, P., 2012. *Quel avenir pour la petite agriculture au Sud?* Presses de sciences Po., Paris.
- Hien, F., Slingerland, M., 1998. Traditional mulching practices in Burkina Faso. *LEISA ILEIA Newsl. Low-Extern.-Input Sustain. Agric.* 37–39.
- Hiernaux, P., Diawara, M., Gangneron, F., 2014. Quelle accessibilité aux ressources pastorales du Sahel? *Afr. Contemp.* 21–35.
- Hoogmoed, W., 1999. Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. Wageningen University [etc.].
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446–460.
- Huang, M., Liang, X., 2006. On the assessment of the impact of reducing parameters and identification of parameter uncertainties for a hydrologic model with applications to ungauged basins. *J. Hydrol.* 320, 37–61.
- Ibrahim, B., 2012. *Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé* (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Ichaou, A., 2000. *Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'Ouest nigérien.*
- INERA, 2011. *Fiche Technique Variétale de Mil.*
- INSD, 2008. *Recensement général de la population et de l'habitation 2004 (RGPH 2004) - Rapport d'analyse du thème 2 : Etat et structure de la population.* Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Iooss, 2011. *Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques.* *J. Société Fr. Stat.* 152, 1–23.
- IPCC, 2013. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IWACO, 1990. *Etude du bilan d'eau au Burkina Faso : Etudes de quatre bassins versants expérimentaux au Burkina Faso. Volume II, bassin de Tougou.*
- JAICAF, 2009. *Les céréales au Niger ; accent sur le mil et le sorgho,* “ Association pour la Collaboration Internationale en matière d'Agriculture et des Forêts du Japon (JAICAF)”.
- Jasmin, C.J.W., Maman Garba, Mahamane Sabiou, Wim Cornelis, 2015. Water and soil conservation for improved crop productivity and water household in sahelian condition, in: *Engeneering Geology for Society and Territory.* p. 618.
- Jayaraman, K., 1999. *Manuel de statistique pour la recherche forestière* (FAO, European Comission and Netherland Development Cooperation). Kerala Forest Reseach Institute, Peechi, India.
- Jensen, J.R., Bernhard, R., Hansen, S., McDonagh, J., Møberg, J., Nielsen, N., Nordbo, E., 2003. *Productivity in maize based cropping systems under various soil–water–nutrient*

- management strategies in a semi-arid, alfisol environment in East Africa. *Agric. Water Manag.* 59, 217–237.
- Kaboré, D., Reij, C., 2004. The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso. *Intl Food Policy Res Inst.*
- Kagambèga, F.W., Thiombiano, A., Traoré, S., Zougmore, R., Boussim, J.I., 2011. Survival and growth responses of *Jatropha curcas* L. to three restoration techniques on degraded soils in Burkina Faso. *Ann. For. Res.* 54, 171–184.
- Kagambèga, F.W., Traoré, S., Thiombiano, A., Lykke, A.M., Boussim, J.I., 2017. Effects of Soil and Water Conservation Techniques on Soil Properties under Degraded Lands in Burkina Faso. *J. Agric. Environ. Sci.* 6. <https://doi.org/10.15640/jaes.v6n2a8>
- Kaiser, D., Lepage, M., Konaté, S., Linsenmair, K.E., 2017. Ecosystem services of termites (Blattoidea: Termitoidea) in the traditional soil restoration and cropping system Zaï in northern Burkina Faso (West Africa). *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.023>
- 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. Paris VI.
- Karambiri, H., Galiano, S.G., Giraldo, J., Yacouba, H., Ibrahim, B., Barbier, B., Polcher, J., 2011. Assessing the impact of climate variability and climate change on runoff in West Africa: the case of Senegal and Nakambe River basins. *Atmospheric Sci. Lett.* 12, 109–115.
- Keita, A., Yacouba, H., Hayde, L.G., Schultz, B., 2014. Comparative Non-linear Regression - Case of Infiltration Rate Increase from Upstream in Valley. *Int. Agrophysics* 28. <https://doi.org/10.2478/intag-2014-0020>
- Kendall, M., 1975. *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London (1975). Google Sch.
- Kiema, A., Nianogo, A.J., Ouedraogo, T., 2008. Effets des cordons pierreux sur la régénération d'un pâturage naturel de glacis au Sahel. *Cah. Agric.* 281–288. <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0204>
- Klajj, M., Vachaud, G., 1992. Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agric. Water Manag.* 21, 313–330.
- Kostiakov, A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans Sixth Comm Int Soc Soil Sci* 1, 7–21.
- Koussoubé, A., 2007. Dynamique du couvert végétal et de la production agricole du bassin versant de Tougou (au nord du Burkina Faso). (No. Mémoire de DESS). Département de Géographie, Université de Ouagadougou.
- Kowalczyk, A., Łabędzki, L., Kuźniar, A., Kostuch, M., 2016. An assessment of crop water deficits of the plants growing on the Małopolska Upland (Poland). *J. Water Land Dev.* 29, 11–22. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0008>
- Kpadonou, R.A.B., Owiyo, T., Barbier, B., Denton, F., Rutabingwa, F., Kiema, A., 2017. Advancing climate-smart-agriculture in developing drylands: Joint analysis of the adoption of multiple on-farm soil and water conservation technologies in West African Sahel. *Land Use Policy* 61, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.050>
- Laloy, E., Bièdiers, C.L., 2008. Plot scale continuous modelling of runoff in a maize cropping system with dynamic soil surface properties. *J. Hydrol.* 349, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.033>
- Lamers, J., Bruentrup, M., Buerkert, A., 1998. The profitability of traditional and innovative mulching techniques using millet crop residues in the West African Sahel. *Agric. Ecosyst. Environ.* 67, 23–35.

- Landon, J., 1991. *Booker Tropical Soil Manual: A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics.*, John Wiley and Sons. ed. New York.
- Larwanou, M., Adam, T., 2008. Impacts de la régénération naturelle assistée au Niger: Etude de quelques cas dans les Régions de Maradi et Zinder 11.
- Le Barbé, L., Lebel, T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol.* 188, 43–73.
- Lebel, T., Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J. Hydrol.* 375, 52–64.
- Le Bissonnais, Y., 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena Suppl.* 13–28.
- LIU, J., Zhang, L., Zhang, Y., Hong, H., Deng, H., 2008. Validation of an agricultural non-point source (AGNPS) pollution model for a catchment in the Jiulong River watershed, China. *J. Environ. Sci.* 20, 599–606.
- Loumerem, M., Van Damme, P., Reheul, D., Behaeghe, T., 2004. Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivées dans les régions arides tunisiennes et sélection de variétés plus performantes. PhD Univ. Gent Fac. D'agronomie Gent.
- Luxereau, A., Roussel, B., 1997. Changements écologiques et sociaux au Niger: Des interactions étroites.
- Maatman, A., Sawadogo, H., Schweigman, C., Ouedraogo, A., 1998. Application of zaï and rock bunds in the northwest region of Burkina Faso: study of its impact on household level by using a stochastic linear programming model. *NJAS Wagening. J. Life Sci.* 46, 123–136.
- Maddison, D., 2007. The perception of and adaptation to climate change in Africa. The World Bank.
- Maestre, F.T., Cortina, J., 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant Soil* 241, 279–291.
- Mahé, G., Paturel, J.-E., 2009. 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geosci.* 341, 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.05.002>
- MAHRH, 2008. Capitalisation des initiatives sur les bonnes pratiques agricoles au Burkina Faso.
- Maïga-Yaleu, S., 2014. Etude géochimique de l'eau de ruissellement du bassin versant de Tougou (bassin supérieur du Nakanbé) au Nord du Burkina Faso. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Maïsharou, A., Chirwa, P.W., Larwanou, M., Babalola, F., Ofoegbu, C., 2015. Sustainable land management practices in the Sahel: review of practices, techniques and technologies for land restoration and strategy for up-scaling. *Int. For. Rev.* 17, 1–19. <https://doi.org/10.1505/146554815816006974>
- Malam Issa, O., Défarge, C., Trichet, J., Valentin, C., Rajot, J.L., 2009. Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics. *CATENA* 77, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.12.013>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts, Tools and Models: A Review, in: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 329–353.
- Mando, A., Zougmore, R., Zombre, P., Hien, V., 2001. Réhabilitation des sols dégradés dans les zones semi-arides de l'Afrique subsaharienne, in: *La Jachère En Afriques*. pp. 311–339.

- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econom. J. Econom. Soc.* 245–259.
- Mara, F., 2010. Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéniennes face à la variabilité du climat: le cas de la ressource en eau dans la vallée de la Sirba au Burkina Faso (PhD Thesis). Université du Québec à Montréal.
- Marchal, M., 1983. Les paysages agraires de Haute-Volta: analyse structurale par la méthode graphique. IRD Editions.
- Martinez, C.J., Thepadia, M., 2010. Estimating Reference Evapotranspiration with Minimum Data in Florida. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136, 494–501. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000214](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000214)
- Mavromatis, T., Stathis, D., 2011. Response of the water balance in Greece to temperature and precipitation trends. *Theor. Appl. Climatol.* 104, 13–24. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0320-9>
- McHugh, O.V., Steenhuis, T.S., Abebe, B., Fernandes, E.C., 2007. Performance of in situ rainwater conservation tillage techniques on dry spell mitigation and erosion control in the drought-prone North Wello zone of the Ethiopian highlands. *Soil Tillage Res.* 97, 19–36.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., others, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society Boston, MA, pp. 179–183.
- Mehdaoui, R., Mili, E.-M., Seghir, A., 2018. Caractérisation à l'aide du SPI de la Sécheresse climatique dans le bassin versant de Ziz (Sud-Est, Maroc). *Eur. Sci. J.* 14. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n21p177>
- MERH, 2015. Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques (PNA) du Burkina Faso.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environ. Model. Softw.* 18, 761–799. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Mishra, S.K., Singh, V.P., 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*, Water Science and Technology Library. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900.
- Morris, J., Barron, J., 2014. *Agricultural Water Management Technology Expansion and Impact on Crop Yields in Northern Burkina Faso (1980-2010): A Review*. CGIAR Chall. Program Water Food.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., others, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747.
- Mounirou, L.A., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahénienne du Burkina Faso: quantification et transposition des données (PhD Thesis). Montpellier 2.
- Mounirou, L.A., Yacouba, H., Karambiri, H., Paturel, J.-E., Mahé, G., 2012. Measuring runoff by plots at different scales: Understanding and analysing the sources of variation. *Comptes Rendus Geosci.* 344, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.08.004>
- Mugabe, F., 2004. Evaluation of the benefits of infiltration pits on soil moisture in semi-arid Zimbabwe. *J. Agron.* 3, 188–190.
- Mügler, C., Planchon, O., Patin, J., Weill, S., Silvera, N., Richard, P., Mouche, E., 2011. Comparison of roughness models to simulate overland flow and tracer transport

- experiments under simulated rainfall at plot scale. *J. Hydrol.* 402, 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.032>
- Mupangwa, W., Walker, S., Masvaya, E., Magombeyi, M., Munguambe, P., 1 International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), P O Box 776, Bulawayo, Zimbabwe, 2016. Rainfall risk and the potential of reduced tillage systems to conserve soil water in semi-arid cropping systems of southern Africa. *AIMS Agric. Food* 1, 85–101. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2016.1.85>
- Murthy, D.P., Bulmer, M., Eccleston, J.A., 2004. Weibull model selection for reliability modelling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 86, 257–267.
- Nasri, M., Moradi, Y., 2011. Zoning drought with extreme dry-spell frequency analysis (case study: Isfahan Province, Iran). *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 74, 457–460.
- Nassourou, L.M., Sarr, B., Alhassane, A., Traoré, S., Abdourahamane, B., 2018. Perception et observation: les principaux risques agro-climatique de l’agriculture pluviale dans l’ouest du Niger. *Vertigo- Rev. Electronique En Sci. Environ.* 18.
- Ndiaye, B., Esteves, M., Vandervaere, J.-P., Lapetite, J.-M., Vauclin, M., 2005. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil. *J. Hydrol.* 307, 294–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.016>
- Neitsch, S.L., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., King, K., 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation. *Agric. Res. Serv. Blackland Res. Cent. Temple Tex.*
- Ngigi, S.N., 2003. What is the limit of up-scaling rainwater harvesting in a river basin? *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 28, 943–956.
- n’Guessan, K.A., Diarrassouba, N., Alui, K.A., Nangha, K.Y., Fofana, I.J., Yao-Kouame, A., 2015. Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d’Ivoire: cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol.* 11, 115–128.
- Niang, D., 2006. Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le Sahel burkinabè. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- Niang, D., Koïta, M., Keita, A., Houndayi, M.C.M., Zoure, C.O., Dara, A.E., 2017. Estimation of Soil Hydrodynamic Parameters Related to Agricultural Practices-Case of the Tougou Experimental Site (Burkina Faso). *J. Environ. Sci. Eng. A* 527.
- Niang, D., Mermoud, A., Yacouba, H., Ribolzi, O., 2012. Temporal evolution of the hydrodynamic behaviour of sandy deposits in the Sahelian part of Burkina Faso. *J. Soil Sci. Environ. Manag.* 3, 297–307.
- Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., Christensen, O.B., Déqué, M., Fernandez, J., Hänsler, A., others, 2012. Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J. Clim.* 25, 6057–6078.
- Nonguierma, A., Tapsoba, F., 2003. Rapport sur l’état de l’environnement au Sahel. Cils Comité Permanent Inter-Etats de Lutte Contre la sécheresse dans le Sahel, Centre Régional Agrhymet.
- Nyamekye, C., Thiel, M., Schönbrodt-Stitt, S., Zoungrana, B., Amekudzi, L., 2018. Soil and Water Conservation in Burkina Faso, West Africa. *Sustainability* 10, 3182. <https://doi.org/10.3390/su10093182>
- Oguntunde, P.G., Lischeid, G., Abiodun, B.J., 2018. Impacts of climate variability and change on drought characteristics in the Niger River Basin, West Africa. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 32, 1017–1034. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1484-y>
- Othman, M.A., Zakaria, N.A., Ab. Ghani, A., Chang, C.K., Chan, N.W., 2016. Analysis of trends of extreme rainfall events using Mann Kendall test : A case study in Pahang and Kelantan river basins. *J. Teknol.* 78. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9696>
- Ouédraogo, S., Lompo, F., 2006. Rapport pilote d’évaluation de l’impact des recherches en GRN en Afrique de l’Ouest et du Centre. INERA, Ouagadougou, Burkina Faso.

- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K., Singh, V.P., 2016. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *CATENA* 147, 595–620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2009. A set of Hydrological Models (Chapter 16), in: *Environmental Hydraulics*, ISTE Ltd. J. M. Tanguy, Paris, pp. 439–509.
- Peugeot, C., 1995. Influence de l'encroustement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahelien (niger). Experimentations in situ et modelisation (PhD Thesis). Université Joseph Fourier (Grenoble).
- Peugeot, C., Esteves, M., Galle, S., Rajot, J.-L., Vandervaere, J., 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *J. Hydrol.* 188, 179–202.
- Philip, J., 1985. Reply to "Comments on steady infiltration from spherical cavities." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 788–789.
- Phillip, J., 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci* 84, 257–264.
- Popova, Z., Kercheva, M., Pereira, L.S., 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrig. Drain. J. Int. Comm. Irrig. Drain.* 55, 201–215.
- Rajot, J.L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiebaut, J.-P., 2009. Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel: cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse* 20, 17–30.
- Rakotoarisoa, M.M., Davranche, A., Amiot, A., La Jeunesse, I., Ballouche, A., Fleurant, C., Jadas-Hécart, A., Landry, D., 2012. Un modèle pluie-débit pour l'aide à la quantification des transferts de pesticides dans un petit bassin versant viticole, in: *Colloque International En Hommage à Gérard Moguedet*. pp. 181–194.
- Raziei, T., Pereira, L.S., 2013. Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agric. Water Manag.* 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>
- Reddy, P.P., 2015. *Climate resilient agriculture for ensuring food security*. Springer.
- Refsgaard, J.C., 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.* 198, 69–97.
- Reij, C., Tappan, G., Smale, M., 2009. *Agroenvironmental transformation in the Sahel: Another kind of "Green Revolution"* (IFPRI Discussion Paper No. 00914), 2020 Vision Initiative. International Food Policy Research Institute.
- Ribolzi, O., Hermida, M., Karambiri, H., Delhoume, J.P., Thiombiano, L., 2006. Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso. *CATENA* 67, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.006>
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *physics* 1, 318–333.
- Rockström, J., Folke, C., Gordon, L., Hatibu, N., Jewitt, G., De Vries, F.P., Rwehumbiza, F., Sally, H., Savenije, H., Schulze, R., 2004. A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through Water System Innovations: an integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 29, 1109–1118.
- Rockström, J., Jansson, P., Barron, J., 1998. Seasonal rainfall partitioning under runoff and runoff conditions on sandy soil in Niger. On-farm measurements and water balance modelling. *J. Hydrol.* 210, 68–92.
- Rojas, R.V., Caon, L., 2016. The international year of soils revisited: promoting sustainable soil management beyond 2015. *Environ. Earth Sci.* 75. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5891-z>

- Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Bulletin Pédologique FAO.
- 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), in: *L'homme Peut-Il Refaire Ce Qu'il a Défait ?*, Congrès International Sur La Restauration Des Terres Dégradées, Des Zones Arides et Semi-Arides, Tunis (TUN). pp. 249–265.
- 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). *Cah. ORSTOM Sér. Pédologie* 28, 159–173.
- Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 1, 82–96.
- Sarr, A.B., Camara, M., 2017. Evolution Des Indices Pluviométriques Extrêmes Par L'analyse De Modèles Climatiques Régionaux Du Programme CORDEX: Les Projections Climatiques Sur Le Sénégal. *Eur. Sci. J.* 13. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n17p206>
- Sawadogo, H., 2011. Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso. *Int. J. Agric. Sustain.* 9, 120–128.
- 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). *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 12, 279–290.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.T., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176.
- Schmengler, A.C., 2011. Modeling soil erosion and reservoir sedimentation at hillslope and catchment scale in semi-arid Burkina Faso. University of Bonn, Bonn.
- Schumann, A., 1993. Development of conceptual semi-distributed hydrological models and estimation of their parameters with the aid of GIS. *Hydrol. Sci. J.* 38, 519–528.
- SCS, 1972. Estimation of direct runoff from storm rainfall, *National Engineering Handbook*. ed.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Serme, I., 2015. Growth and yield of sorghum under different conservation tillage and water and nutrient management practices in the South Sudan Zone of Burkina faso (PhD Thesis). Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST), Kumassi, Ghana.
- Serpantié, G., Tézenas du Montcel, L., Valentin, C., 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien: conséquences et propositions.
- Shi, W., Huang, M., Gongadze, K., Wu, L., 2017. A Modified SCS-CN Method Incorporating Storm Duration and Antecedent Soil Moisture Estimation for Runoff Prediction. *Water Resour. Manag.* 31, 1713–1727. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1610-0>
- Siene, L.A.C., Soko, D.F., Diouf, O., Ake, S., 2016. Evaluation de l'impact de stress hydriques sur la croissance et le rendement du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) pour deux conditions de fertilisation azotée dans un environnement tropical semi-aride [Evaluation of water stress impact on growth and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) for two nitrogen fertilization conditions in semi-arid tropical environment]. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 14, 779.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone J.* 7, 587–600.

- Smith, R., 1992. Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at the field scale. Volume 1, documentation. Research report. Agricultural Research Service, Albany, CA (United States). Western Utilization Research and Development Div.
- Souley Yero, K., 2012. Evolution de l'occupation des sols dans l'ouest du Niger: influence sur la cycle de l'eau (PhD Thesis). Grenoble.
- Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., 2012. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds - the two-CN system approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1001–1015. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012>
- Stern, R., Rijks, D., Dale, I., Knock, J., 2006. *Instat climatic guide*. First version, 330p.
- Stocker, T., 2014. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Suzuki, K., Matsunaga, R., Hayashi, K., Matsumoto, N., Tobita, S., Bationo, A., Okada, K., 2016. Long-Term Effects of Fertilizer and Organic Matter Application on Millet in Niger. *Agron. J.* 108, 873. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0375>
- Svendsen, M., Ewing, M., Msangi, S., others, 2009. *Measuring irrigation performance in Africa*. International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Thiombiano, A., Kampmann, D., 2010. *Atlas de la Biodiversité de L'Afrique de L'Ouest, Tome II: Burkina Faso*. Goethe-Universität Frankfurt am Main, Geowissenschaften/Geographie.
- Tostain, S., Marchais, L., 1993. Évaluation de la diversité génétique des mils (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.) au moyen de marqueurs enzymatiques et relations entre formes sauvages et cultivées.
- UN OCHA, 2018. *Crise Alimentaire et Nutritionnelle Aiguë au Sahel : Un Appel à l'Action*, juin 2018.
- Vall, E., Andrieu, N., Dugué, P., Richard, D., Tou, Z., Diallo, M.A., 2008. Evolutions des pratiques agropastorales et changements climatiques en zone soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest: proposition d'un modèle conceptuel de l'interaction climat-écosystèmes de production agropastoraux.
- Vandervaere, J.-P., Vauclin, M., Elrick, D.E., 2000. Transient flow from tension infiltrometers II. Four methods to determine sorptivity and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1272–1284.
- Velluet, C., 2014. *Modélisation et analyse pluriannuelles du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral (Sud-Ouest Niger)* (PhD Thesis). Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Vlaar, J., 1992. *Les techniques de Conservation des Eaux et des Sols dans les pays du Sahel*.
- Waïgalo, A., 2018. *Déterminants et persistance de l'insécurité alimentaire au sahel: cas du Mali*. *Tropicultura* 36.
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Jensen, M., Itenfisu, D., Mecham, B., Howell, T., Snyder, R., Brown, P., Echings, S., others, 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation, in: *Watershed Management and Operations Management 2000*. pp. 1–11.
- Warrick, A., Broadbridge, P., 1992. Sorptivity and macroscopic capillary length relationships. *Water Resour. Res.* 28, 427–431.
- Wheater, H., Jakeman, A., Beven, K., 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modelling. *Model. Change Environ. Syst.* John Wiley Sons Chichester 101–132.
- White, I., Sully, M., 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23, 1514–1522.

- Wiggins, S., Sharada, K., 2013. Looking back, peering forward: Food price & the food spike of 2007–2008, Overseas Development Institute. ed.
- Wildemeersch, J.C.J., Garba, M., Sabiou, M., Fatondji, D., Cornelis, W.M., 2015. Agricultural drought trends and mitigation in Tillaberí, Niger. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 414–425. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.999642>
- WOCAT, 2019. Le système Vallerani : Burkina Faso.
- WOCAT, 2017a. Zaï - Tassa [Niger] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/wocat/technologies/view/technologies_1219/
- WOCAT, 2017b. Cordon pierreux [Niger] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/wocat/technologies/view/technologies_1616/
- WOCAT, 2016a. Ouvrages Anti Erosifs [Burkina Faso] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/wocat/technologies/view/technologies_613/
- WOCAT, 2016b. Les démi-lune [Burkin Faso] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/unccd/view/unccd_364/
- WOCAT, 2014. Bande enherbées [Niger] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/wocat/technologies/view/technologies_1621/ (accessed 9.10.18).
- WOCAT, 2011. Trous de plantation [Niger] [WWW Document]. Glob. Database Sustain. Land Manag. URL https://qcat.wocat.net/fr/wocat/technologies/view/technologies_1100/
- WOCAT, 2010. WOCAT database on Sustainable Land Management (SLM) technologies and SLM approaches [WWW Document]. URL www.wocat.net (accessed 8.28.17).
- WOCAT, 2007. Where the land is greener: case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. Berne.
- Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., Jr, Van Mullem, J.A., Quan, Q.D., 2003. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio, in: *World Water & Environmental Resources Congress 2003*. pp. 1–10.
- Zhang, L., O'Neill, A.L., Lacey, S., 1996. Modelling approaches to the prediction of soil erosion in catchments. *Environ. Softw.* 11, 123–133.
- Zhao, L., Wu, F., 2015. Simulation of Runoff Hydrograph on Soil Surfaces with Different Microtopography Using a Travel Time Method at the Plot Scale. *PLOS ONE* 10, e0130794. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130794>
- Zongo, B., 2016. Stratégies innovantes d'adaptation à la variabilité et au changement climatiques au Sahel : Cas de l'irrigation de complément et de l'information climatique dans les exploitations agricoles du Burkina Faso. Université de Liège, Belgique.
- Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T., 2015. Farmers' Perception and Willingness to Pay for Climate Information in Burkina Faso. *J. Agric. Sci.* 8, 175. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n1p175>
- Zorom, M., Barbier, B., Gouba, E., Somé, B., 2018. Mathematical modelling of the dynamics of the socio-economic vulnerability of rural Sahelian households in a context of climatic variability. *Model. Earth Syst. Environ.* 1–11.
- Zougmoré, R., 2003. Integrated water and nutrient management for sorghum production in semi-arid Burkina Faso. Université de Wageningen, Pays Bas.
- Zougmoré, R., Guillobez, S., Kambou, N., Son, G., 2000a. Runoff and sorghum performance as affected by the spacing of stone lines in the semiarid Sahelian zone. *Soil Tillage Res.* 56, 175–183.
- Zougmoré, 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. *Agric. Food Secur.* 3, 16. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-3-16>

- Zougmore, R., Kambou, N., Guillobez, S., 1993. Première approche de l'impact des ouvrages anti érosifs en pierre sur le ruissellement et les rendements en sorgho : Etude des écartement sur un bassin versant dans le plateau central, in: *Gestion Durable Des Sols et Environnement En Afrique Intertropicale*. Presented at the Colloque International de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso, pp. 278–283.
- Zougmore, R., Mando, A., Ringersma, J., Stroosnijder, L., 2003. Effect of combined water and nutrient management on runoff and sorghum yield in semiarid Burkina Faso. *Soil Use Manag.* 19, 257–264. <https://doi.org/10.1079/SUM2003199>
- Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, L., 2004a. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil–plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agric. Water Manag.* 65, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.07.001>
- Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, L., 2004b. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil–plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agric. Water Manag.* 65, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.07.001>
- Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, L., Ouédraogo, E., 2005. Economic benefits of combining soil and water conservation measures with nutrient management in semiarid Burkina Faso. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 70, 261–269.
- Zougmore, R., Ouattara, K., Mando, A., Ouattara, B., 2004c. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse* 15, 41–48.
- Zougmore, R., Zida, Z., 2000. Recupération agronomique des terres encroutées par la technique de demi-lune (Fiche technique No. 5). INERA, Koudougou, Burkina Faso.
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, F., 2000b. Récupération agronomique des terres encroutées par la technique de Zaï (Fiche technique No. 6). INERA, Koudougou, Burkina Faso.
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, N.F., 2003. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil Tillage Res.* 71, 143–149. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00050-3)
- Zouré, C., Queloz, P., Koïta, M., Niang, D., Fowé, T., Yonaba, R., Consuegra, D., Yacouba, H., Karambiri, H., 2019. Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in Northern Burkina Faso. *CATENA* 173, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.002>

Liste des Figures

Figure 1-1: Situation alimentaire et nutritionnelle projetée au Sahel et en Afrique de l'Ouest : Juin-Août 2018.....	10
Figure 1-2: Evolution du nombre des séquences sèches (en haut) et de la durée des séquences sèches (en bas) au niveau de la Station de Tillabery et Gaya	12
Figure 1-3: Augmentation des débits des cours d'eau sahéliens durant la sécheresse.....	16
Figure 1-4: Dessin technique de la technologie des cordons pierreux	19
Figure 1-5: Dessin technique de la technologie du Zaï	21
Figure 1-6: Dessin technique de la technologie des demi-lunes	23
Figure 1-7: dessin technique de la technologie des bandes enherbées renforcée d'une plantation de ligneux espacée de 4 mètres	25
Figure 1-8 : Différents types de techniques de conservation des eaux et des sols adoptées en zones Sahélienne	28
Figure 1-9: Schéma d'une toposéquence typique des zones sahéliennes	32
Figure 2-1: Localisation du site expérimental dans le bassin versant de Tougou	37
Figure 2-2 : Diagramme climatique issu des données climatiques de la station de Ouahigouya durant la période 1961-2009	38
Figure 2-3: Évolution interannuelle de l'indice de pluie standardisée à Ouahigouya durant la période 1961-2015	39
Figure 2-4 : Évolution de la population à Tougou de 1952 à 2004.....	42
Figure 2-5 : Photographie illustrant le site expérimental (a) et la croûte d'érosion (b) avec épandage de graviers ferrugineux et ferro-manganiques.....	46
Figure 2-6: Ouverture de fosse pédologique avec illustration des différents profils	47
Figure 2-7: Dispositif expérimental de Tougou.....	48
Figure 2-8: Photo d'ensemble du dispositif expérimental de Tougou.....	48
Figure 2-9: Photos des pratiques agricoles en début de saison des pluies (juillet 2015)	50
Figure 2-10: Dispositif de mesure des précipitations et des paramètres météorologiques	51
Figure 2-11: Dispositif de mesure de la lame d'eau ruisselée: (a) partiteur, (b) fût de 250 litres	52
Figure 2-12: Exemple de courbe de tarage des fûts de 250 litres. A gauche la courbe obtenue sur la parcelle témoin du bloc A (T0A) et à droite la courbe obtenue sur la parcelle de Zaï du bloc B (T3B).	52
Figure 2-13: Dispositif de mesure des variables d'états	53
Figure 2-14: Dispositif de mesure des propriétés hydrauliques de surface.....	54
Figure 3-1: Exemple de stabilisation du flux d'infiltration au cours d'un essai sur la parcelle témoin	59
Figure 3-2: Cumuls et histogramme des pluies journalières après les dates de semis 2015, 2016 et 2017.....	65
Figure 3-3 : Corrélation entre les ruissellements observés sur les parcelles de traitements identiques	68
Figure 3-4: Boîte à moustache des 'événements de ruissellement de 2015, 2016 et 2017 combinés (36 événements).....	69
Figure 3-5: Détermination de la pluie limite de ruissellement (Plr) sur les différentes techniques agricoles.	70

Figure 3-6: Relation entre la taille moyenne des pores fonctionnels et la conductivité hydraulique selon les différentes techniques agricoles	75
Figure 3-7: Eau stagnante dans la demi-lune et poquet de Zaï, 2 jours après une pluie de 124 mm en juillet 2015. Croûte de décantation dans la demi-lune, et du sable piégé dans une fine couche d'argile dans le poquet de Zaï	77
Figure 3-8: Analyse granulométrique réalisée à la surface des différentes techniques agricoles	78
Figure 3-9 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs (10, 50 et 100cm) selon les techniques CES en 2016. Les opérations de sarclage ont eu lieu respectivement le 20/07/2016 et le 18/08/2016	80
Figure 3-10 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs (10, 50 et 100cm) selon les techniques CES en 2017.	80
Figure 3-11: Vue d'ensemble de l'évolution temporelle des profils hydriques pour chaque type de pratique agricole en 2016.	82
Figure 3-12 : Evolution temporelle des charges de pressions à différentes profondeurs (20, 60 et 120 cm) sur les différentes techniques agricoles en 2016.....	83
Figure 3-13: Evolution temporelle du gradient de charge hydraulique entre 80 et 120 cm de profondeur du sol pour les techniques du semis direct et du zaï durant l'année 2016.....	84
Figure 4-1: Représentation schématique des processus dans le modèle conceptuel SCS-CN modifié	96
Figure 4-2: Ruissellement observé et simulé en 2015 (période de validation).	102
Figure 4-3: Ruissellement observé et simulé en 2016 (période de calibration).	103
Figure 4-4: Ruissellement observé et simulé en 2017 (période de validation).	104
Figure 4-5: Test de sensibilité du modèle SCS-CN modifié au paramètres Ia.max et Smax pour l'année 2016 sur la technique de zaï.....	105
Figure 4-6: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2015 pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune.....	109
Figure 4-7: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2016 pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune.....	110
Figure 4-8: Evolution de la pluviométrie et du stockage modélisé de l'eau du sol pendant la saison des pluies 2017 pour le témoin, le cordon pierreux, le zaï et la demi-lune.....	111
Figure 4-9: Probabilité de dépassement du stockage de l'eau du sol en 2015 et 2016 pour les quatre types de parcelles.	112
Figure 4-10: Photo prise en 2016 illustrant la croissance des cultures du mil 72 JAS selon différentes techniques agricoles.	113
Figure 4-11: Photo prise en 2017 illustrant la croissance des cultures du mil 71 JAS selon différentes techniques agricoles	114
Figure 5-1: Schéma indiquant les paramètres géométriques de la technique du zaï	126
Figure 5-2 : Nombre de poches sèches saisonnier supérieur à 7, 14 et 21 jours en fonction des indices de précipitation standardisés (IPS) observés sur la période 1961-2009..	127
Figure 5-3: Longueur maximale des poches sèches saisonnières en fonction de l'IPS observée sur la période 1961-2009	128
Figure 5-4: Evolution pluviométriques des saisons de pluie 1990, 1997 et 2000 et performances des pratiques agricoles à limiter l'effet des poches sèches pluviométriques répétitives n'excédant pas 3 semaines chacune.....	130

Figure 5-5: Evolution pluviométriques des saisons de pluie 1972, 1982 et 1983 et Performance hydrologique des pratiques agricoles face aux longues poches sèches de plus de trois semaines	132
Figure 5-6: Performances hydrologiques des pratiques agricoles simulées sur la période 1961-2009.....	133
Figure 5-7: Combinaison des paramètres géométriques conduisant à la satisfaction hydrique des plants pour les années de la période historique de 1961 à 2009.	136
Figure 5-8 : Combinaison des paramètres géométriques conduisant à la satisfaction hydrique des plants pour les années de la période historique de 1961 à 2009.....	138
Figure 6-1: Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles observées et simulées des modèles du projet AMMA-2050.....	148
Figure 6-2: Fréquence d'apparition des classes de poches sèches observées et simulées sur la période historique de 1961-2005.....	149
Figure 6-3: Evapotranspiration de référence moyenne mensuelle observées et simulées par les modèles du projet AMMA-2050 sur la période de référence	150
Figure 6-4 : Tendances des précipitations annuelles et des longues poches sèches par saison projetées par les modèles	152
Figure 6-5 : Comparaison de l'ET0 moyenne mensuelle historique durant la période 1961-2005 avec l'ET0 moyenne mensuelle projetée à l'horizon 2099	155
Figure 6-6:Taux de satisfaction hydrique du zaï de 40 cm de diamètre pour le scénario HadGEM2-ES RCP4.5 et le scénario CanESM2 RCP8.5 à l'horizon 2050 et 2099.	156
Figure 6-7: Seuil de la poche sèche pluviométrique susceptible de générer un déficit hydrique du sol.....	158

Liste des Tableaux

Tableau 1-1: Impact des certaines techniques CES sur le rendement de sorgho dans certaines régions du Burkina Faso. Source (Nyamekye et al., 2018)	30
Tableau 2-1 : Texture du sol sur lequel est installé le dispositif expérimental de Tougou. pF2.5 : Humidité à la capacité au champ, pF4.2 : Humidité au point de flétrissement (BUNASOLS, 2015).....	47
Tableau 3-1 : Caractéristiques des précipitations et cumul des ruissellements pendant les saisons agricoles 2015-2017.....	66
Tableau 3-2 : Conductivité moyenne (Ks) par techniques agricoles avant le début des saisons pluvieuses en avril 2015, 2016 et 2017.....	72
Tableau 3-3 : Nombre de mesures retenues, sorptivité (S), conductivité hydraulique moyenne (K) et taille moyenne des pores actifs (λ_m) pour différentes succion et par techniques agricoles avant le début des saisons pluvieuses en avril 2016.....	74
Tableau 4-1: Fonctions utilisées dans les différents modèles	91
Tableau 4-2:Description des paramètres indépendants de l'état et de leurs valeurs pour chaque pratique agricole.....	99
Tableau 4-3:Rendement moyen des grains de mil enregistré sur chaque parcelle pour les années 2015, 2016 et 2017.....	115
Tableau 5-1: Classification de la sécheresse selon l'IPS adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (d'après Mehdaoui et al., 2018)	121
Tableau 5-2:Statistique des performances hydrologiques saisonnières des pratiques agricoles sur la période historiques 1961-2009	134
Tableau 5-3 : Caractéristiques géométriques optimales des poquets de zaï.....	139
Tableau 6-1: Liste des Modèles Climatiques Globaux (MCGs) du Projet AMMA-2050	144
Tableau 6-2 : Résultats du test de Mann-Kendall sur les série de précipitations et de longues poches sèches mettant en évidence la pente de Sen et la P-value pour les scénarii d'émission RCP4.5 et RCP8.5.....	153

Annexes

Annexe 1 : Caractérisation des sols du site de Tougou (BUNASOL, 2015)	185
Annexe 2 : Plan topographique de la parcelle expérimentale à Tougou	188
Annexe 3 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs sur les différentes techniques agricoles du block B (2016 et 2017)	189
Annexe 4 : Profils hydriques pour chaque technique culturale en 2017	190
Annexe 5 : Relation entre le nombre de jours secs agronomiques et le déficit hydrique pour chaque pratique agricole sur la période 1961-2009	191
Annexe 6 : Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles observées et simulées des modèles du projet AMMA-2050.....	191
Annexe 7 : Liste des publications	192

Annexe 1 : Caractérisation des sols du site de Tougou (BUNASOL, 2015)

I. METHODOLOGIE

L'observation faite, sur le site de Tougou pour la caractérisation du sol, est une fosse pédologique ouverte. Les informations collectées concernent les données de surface et celles internes au sol :

- les données de surface sont relatives à l'environnement du profil, à l'utilisation actuelle du sol, à la végétation naturelle ou anthropique, aux formes d'érosion, aux affleurements de cuirasse ou de roches, etc. ;
- les données internes au sol concernent la profondeur du sol, la couleur des horizons, la présence de taches, la texture, les éléments grossiers, la structure, la consistance, la porosité, le système racinaire, l'activité d'origine biologique.

Le profil pédologique a été décrit selon les directives FAO (1994) et classifiés selon les systèmes français CPCS (1967) et WRB (2006).

II. SOLS

2.1 Utilisation et végétation actuelle

Le site est un zipellé, par conséquent il n'est pas exploité. Il est colonisé par une végétation naturelle composée de quelques rares espèces arbustives : *Balanites aegyptiaca*, *Acacia nilotica* et *Leptadenia hastata*.

2.2. Unités pédologiques

Une seule classe, celle des sols à sesquioxydes de fer et de manganèse de la CPCS a été rencontrée sur site. Ces sols se sont développés sur des granites acides. Leur couleur d'ensemble se situe dans la gamme des 7,5YR. Ils sont marqués par l'individualisation des sesquioxydes. Le lessivage par lequel certains éléments fins sont entraînés vers la profondeur est un processus pédogénétique important qui caractérise ces sols. Le concrétionnement et l'hydromorphie sont des phénomènes secondaires qui ont permis de distinguer le sous-groupe de la classe : **les sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions.**

2.2.1. Etats de surface

Le site est situé sur le bas de pente de glaciaire. La topographie environnante est quasi plane. Aucun affleurement n'est observé. Le ruissellement de l'eau est se fait en nappe diffuse. Il est parcouru entièrement par des croûtes d'érosion (**Cf. photo 1**) qui limitent l'infiltration et accroissent le ruissellement. Ainsi, le sol est resté sec le lendemain d'une pluie (jour de la caractérisation) alors qu'un ruissellement s'est produit au-dessus sur les croûtes de battance. Par ailleurs, il est observé un épandage de graviers ferrugineux et ferro-manganiques. Ces éléments sont par moment concentrés par endroit sur le site. (**Cf. photo 2**).

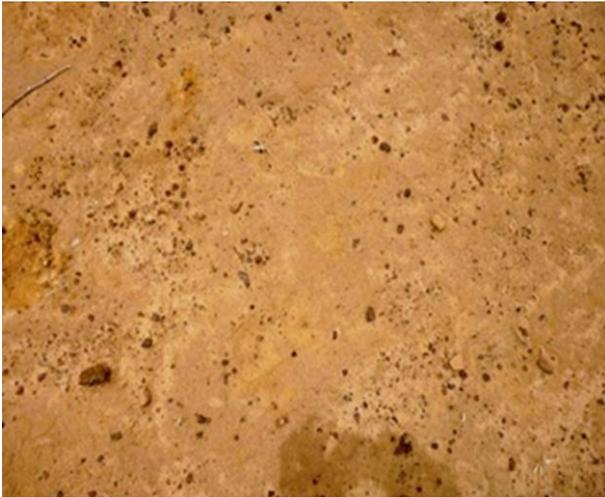


Photo 1 : Croûtes d'érosion



Photo 2 : Epandage de graviers ferrugineux et ferro-manganiques

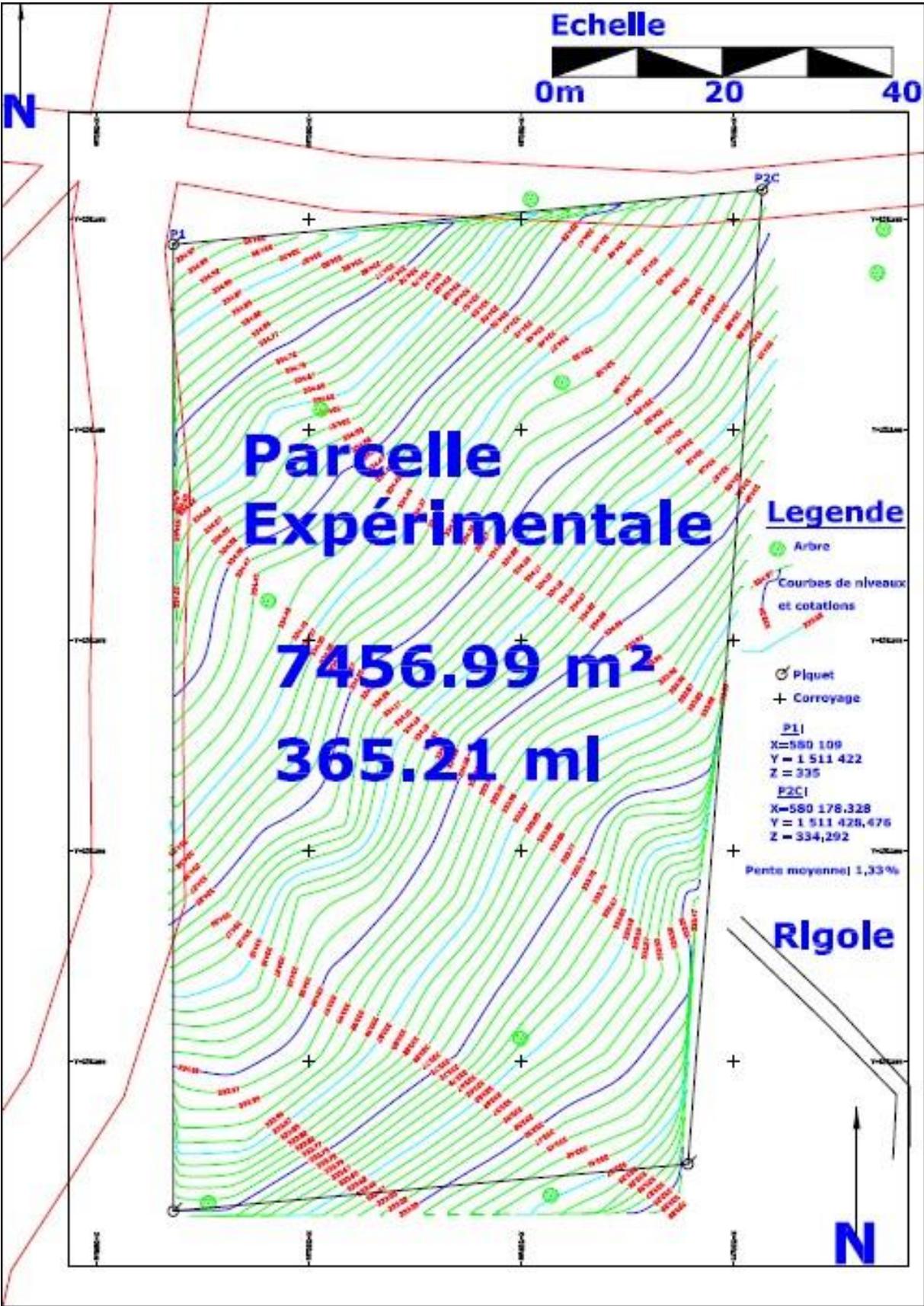
2.2.2. Caractéristiques morphologiques

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions sont des sols profonds (120 cm). A l'état sec, ils ont une couleur brun foncé (7,5YR5/6) jusqu'à 22 cm, brun jaunâtre (10YR5/6) de 22 à 56 cm et jaune brunâtre : 10YR6/6 et 10YR6/8 respectivement entre 56 à 83 cm et 83 à 120 cm. Ils sont bien drainés dans les 56 premiers centimètres. Par contre, ils le sont modérément dans les 64 centimètres sous-jacents où apparaissent des taches bruns très pâles (10YR7/4) pour des teneurs estimées à 5 %. La charge graveleuse est très faible. Elle est constituée de graviers ferro-manganiques dont les proportions varient en fonction de la profondeur entre 2 et 10 %. La texture est limono-sableuse dans l'épaisseur 0-22 cm, limono-argileuse entre 22 et 83 cm et argileuse entre 83 et 120 cm. La structure est polyédrique subangulaire faiblement développée jusqu'à 83 cm et massive au-delà. La porosité est bonne dans tout le profil. Abondantes dans les 22 premiers centimètres, les racines se disparaissent à la base du profil. L'activité biologique est moyennement développée en surface et reste non visible en profondeur. (Photo 3)

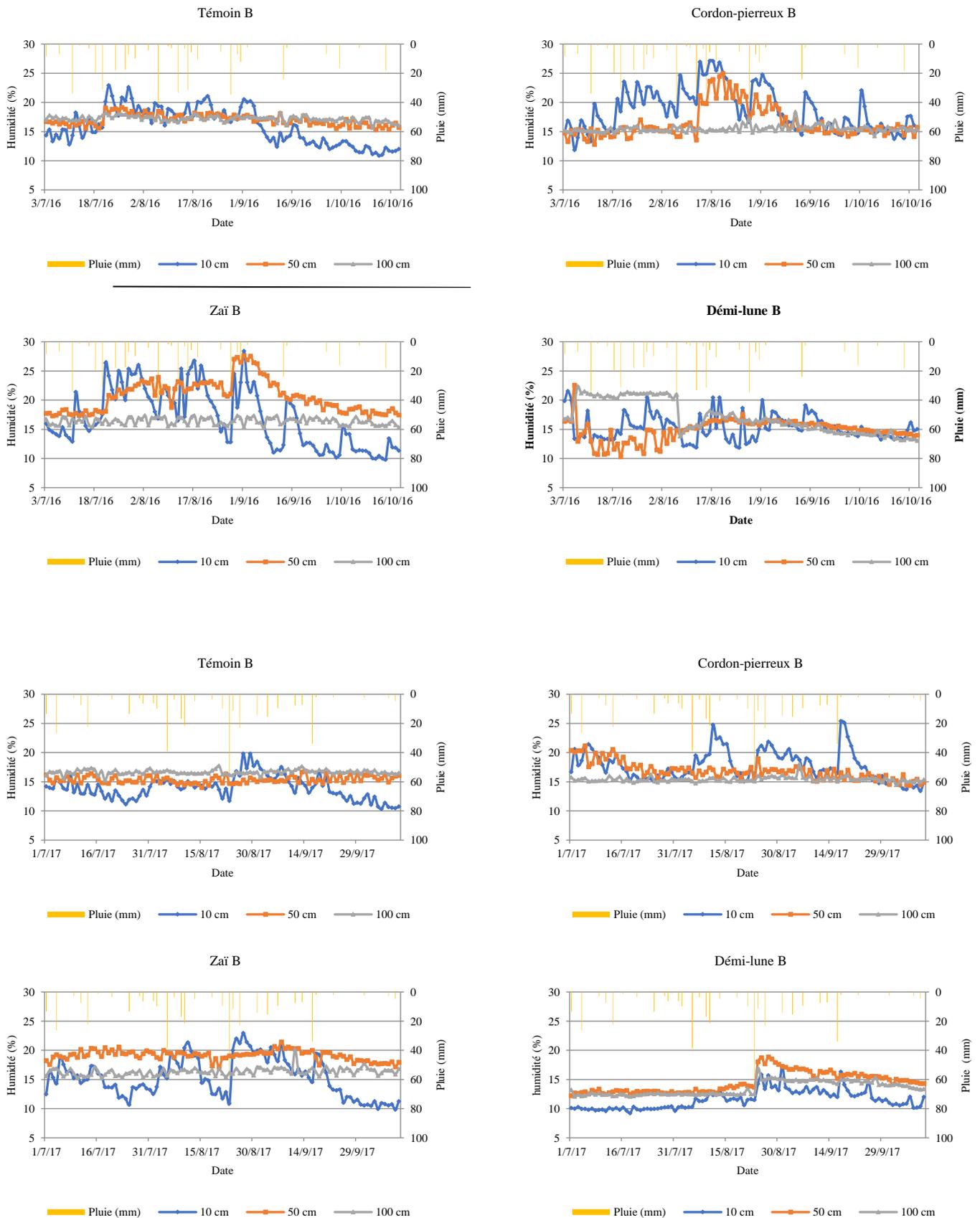


Photo 3 : Sol ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions

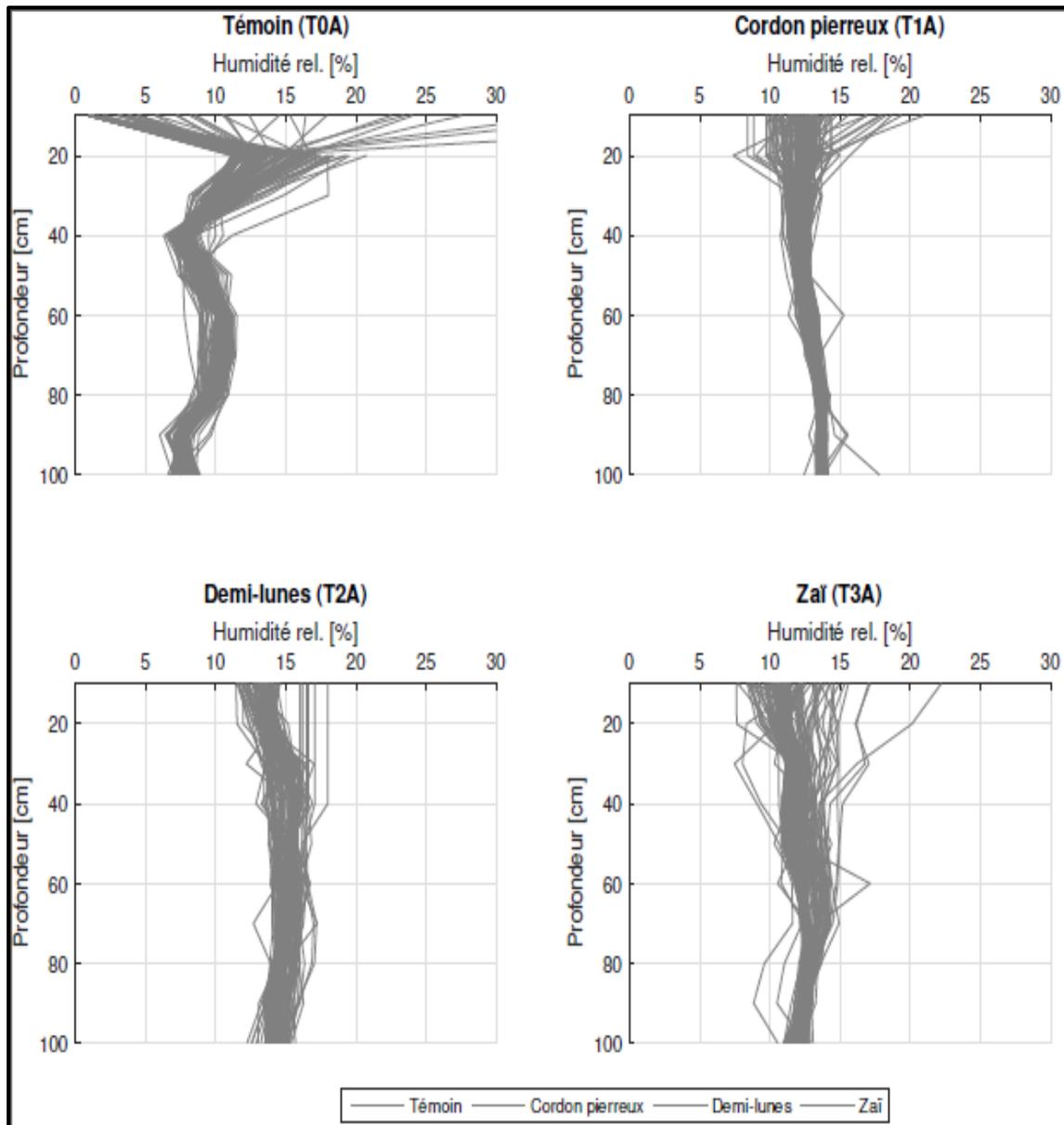
Annexe 2 : Plan topographique de la parcelle expérimentale à Tougou



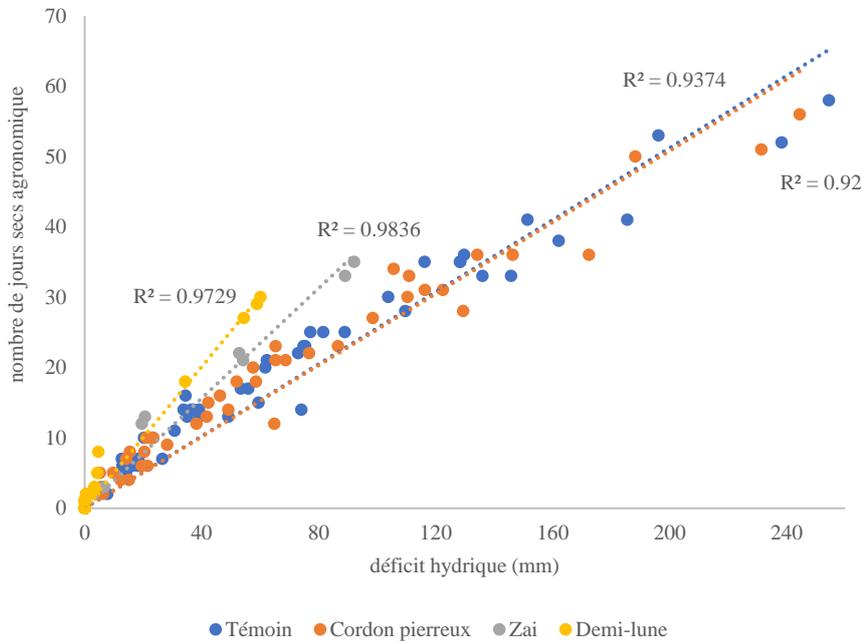
Annexe 3 : Evolution temporelle de la teneur en eau à différentes profondeurs sur les différentes techniques agricoles du block B (2016 et 2017)



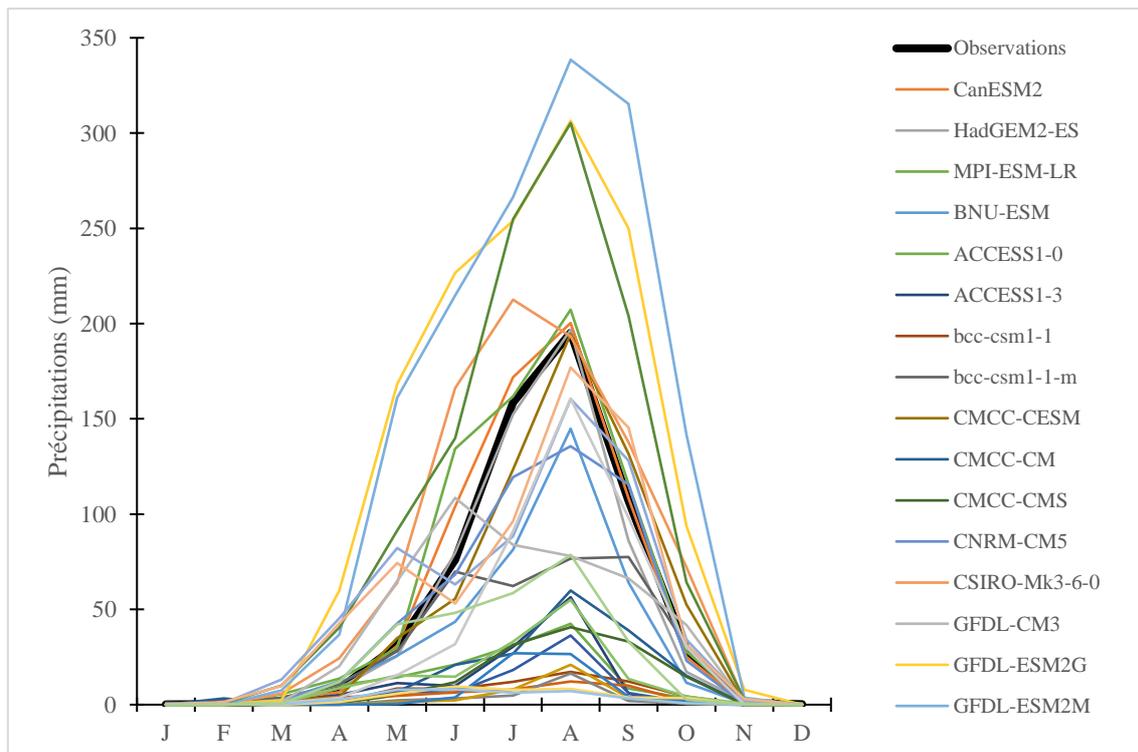
Annexe 4 : Profils hydriques pour chaque technique culturale en 2017



Annexe 5 : Relation entre le nombre de jours secs agronomiques et le déficit hydrique pour chaque pratique agricole sur la période 1961-2009



Annexe 6 : Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles observées et simulées des modèles du projet AMMA-2050



Annexe 7 : Liste des publications

Articles

- Zouré, C.**, Queloz, P., Koïta, M., Niang, D., Fowé, T., Yonaba, R., Consuegra, D., Yacouba, H., Karambiri, H., 2019. Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in Northern Burkina Faso. CATENA 173, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.002>
- Zouré, C.O.**, KOITA, M., Niang, D., Baba, I.I., Yonaba, O.R., Dara, A.E., Fowé, T., Queloz, P., Karambiri, H., 2017. Relationship between soil water content and crop yield under sahelian climate conditions: case study of Tougou experimental site in Burkina Faso. J. Adv. Phys. 5177–5184.

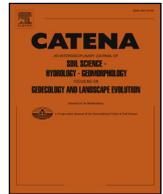
Actes des colloques ou conférences

- Zouré, C.O.**, Karambiri, H., Niang, D., Koïta, M., Consuegra, D., Yonaba, R., 2019. Etude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone Sahélienne du Burkina Faso. Présentée au Colloque Désertif'actions 2019, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Zouré, C.O.**, Karambiri, H., Niang, D., Koïta, M., Consuegra, D., Yonaba, R., 2017. Impacts des pratiques culturales sur le fonctionnement des hydrosystèmes dans le bassin versant de Tougou au Burkina Faso, in: Impacts Anthropiques et Climatiques sur la Variabilité des Ressources en Eau. Présentée au colloque Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017), medfriend water, Hammamet (Tunisie), pp. 62–68.
- Zouré, C.O.**, 2017. Impacts des pratiques culturales sur le fonctionnement des hydrosystèmes dans le bassin versant de Tougou (Burkina Faso). Présentée à la 5^{ème} Edition des Doctoriales 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso et sanctionnée par le **2^{ème} Prix** de la meilleure communication.
- Zouré, C.O.**, 2016. Impacts des pratiques culturales sur le fonctionnement des hydrosystèmes dans le bassin versant de Tougou (Burkina Faso). Présentée à la 4^{ème} Edition des Doctoriales 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso et sanctionnée par le **3^{ème} Prix** de la meilleure communication.
- Zouré, C.O.**, 2015. Méthodologie mise en place pour l'évaluation des impacts des techniques culturales sur les composantes du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle, in: Doctorat et Monde Industriel, Quelles Interaction. Présentée aux Doctoriales conjointes, INPHB, Yamoussoukro, Cote d'Ivoire.

Contributions aux publications et interview

- Niang, D., Koïta, M., Keita, A., Houndayi, M.C.M., **Zouré, C.O.**, Dara, A.E., 2017. Estimation of Soil Hydrodynamic Parameters Related to Agricultural Practices-Case of the Tougou Experimental Site (Burkina Faso). J. Environ. Sci. Eng. A 527.
- Leye, B., **Zouré, C.O.**, Yonaba, O.R., Karambiri, H. (Accepted at Springer Nature Book Ed for publication). Research on hydrology and water resources at the scale of small and medium watersheds in Burkina Faso in a context of climate change.
- Zouré, C.O.**, 2018. Atelier de restitution des travaux de recherche menés sur les pratiques culturales dans le cadre du Programme 3E, Volet Cycle de l'Eau. Interview diffusée à la Radio régionale du Paysan à Ouahigouya. Emission du 30 Octobre à 12h00 et à 19h00, en langues Française et Mooré.

PUBILICATIONS



Modelling the water balance on farming practices at plot scale: Case study of Tougou watershed in Northern Burkina Faso

C. Zouré^{a,*}, P. Queloz^b, M. Koïta^a, D. Niang^a, T. Fowé^a, R. Yonaba^a, D. Consuegra^b, H. Yacouba^a, H. Karambiri^a

^a Laboratory of Hydrology and Water Resources (LEAH), International Institute for Water and Environmental Engineering (2iE), Ouagadougou, Burkina Faso

^b Institute of Territorial Engineering INSIT, School of Business and Engineering Vaud (HEIG-VD), University of Applied Sciences, Yverdon-les-Bains, Switzerland

ARTICLE INFO

Keywords:

Water harvesting techniques
Sahel
SCS-CN model
Water balance
Rainfall variability

ABSTRACT

In the Sahel region, farmers have adopted various farming practices to improve agricultural yields in order to offset an increasingly variable climate regime and the extension of degraded land. This study analyses the functional behaviour of such three selected water-harvesting techniques (stone rows, zaï and half-moon) as compared to the traditional tillage method through a comprehensive experimental setup monitored during three consecutive growing seasons (2015–2017). The results indicate that these farming practices allow a runoff reduction by 25 to 100%. We propose a continuous model simulating the hydrological dynamics of the farming techniques at plot scale. This model is able to reproduce accurately the observed runoff ($R^2 = 0.73 - 0.95$), and gives an insight of the variability of the water storage for each type of techniques in response to the rainfall regime. It appears in particular that zaï and half-moons are able to mitigate the effect of dry spells by sustaining available water for crops over extended periods up to three weeks, whereas the direct seeding and stone row techniques rapidly leads to plant water deficit after five days. Even though water infiltration is essentially fostered by surface water retention during rainfall events, our observations suggest that the changes induced to the hydrological dynamics by farming practices also affect soil physical, chemical and biological properties. These effects help completing the explanation of crop yield improvements, but raise some questions of soil evolution and farming practice performances in the long run.

1. Introduction

In the Sahel, agriculture is dominated by cereal-based cropping systems, which accounts for 97% of rainfed crops (Rockström et al., 2004). Low-income and difficult access to underground water restrict irrigation agriculture only in the close vicinity of the reservoirs, hence making each seasonal harvest essential for the subsistence of the local population. During the last decades, decreasing annual rainfall combined with growing anthropogenic pressures have accelerated soil degradation processes and increased the surface of barren land (Mahé and Paturel, 2009; Maïsharou et al., 2015). This situation has led development partners to regain interest and improve traditional farming techniques, especially after the succession of dry years in 1972/73 and 1983/85 (Maïsharou et al., 2015). The nature of these farming practices are as diverse as soil amendment, water harvesting, erosion control and mixed measures (e.g. assisted natural regeneration). These farming practices aim at providing more favourable conditions for vegetation development and gradually restore the natural functions of the soil by

improving its physical and chemical properties. These practices have helped to rehabilitate 200, 000 to 300, 000 hectares of degraded land and produce 80, 000 tons of additional food per year in the central plateau of Burkina Faso (Reij et al., 2009). This explains the large adoption rate of farmers (more than 70%) of at least one of these techniques (Zongo, 2016; Kpadonou et al., 2017).

Many scientific studies regarding farming practices are available, but they are mostly focused on cereal yield (Da, 2008; Danjuma and Mohammed, 2015), on their potential for soil restoration or on their impact on the local economic income (Zongo, 2016; Zougmore et al., 2005). However, there is little literature on the changes induced by these practices on the water regime and hydrological processes (Duponnois and Dia, 2013). These techniques involve significant alterations of the surface topography, thus strongly affecting the hydrological dynamics by providing an intermediate retention volume, hence avoiding rapid losses through runoff and increasing infiltration. On the longer term, these changes in hydrodynamics also influence the soil properties, altering its physical, chemical and biological processes

* Corresponding author.

E-mail address: oumar.zoure@2ie-edu.org (C. Zouré).

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.002>

Received 15 March 2018; Received in revised form 2 October 2018; Accepted 4 October 2018

0341-8162/ © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

(Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2014). For example, limiting surface runoff does not only entail larger infiltration, but it also impedes the flushing of amendments and prevent sediment loss (Zougmore et al., 2003a).

In order to assess the impact of the different farming techniques and the prevailing climatic regime on the water balance, modelling could be a valuable analysis tool as many processes are not easily measurable and the climate forcing cannot be controlled. For that matter, a continuous model is required, which encompasses recharge, transfer and discharge processes both during the intra- and inter-events periods. Two-dimensional runoff models (based on the shallow water equations) have successfully simulated observed runoff dynamics on infiltrating surfaces at plot scale (Esteves et al., 2000; Fiedler and Ramirez, 2000; Mügler et al., 2011). However, such models are compute-intensive for complex geometries, which makes them unpractical for continuous simulations. In addition, they lack an explicit characterization of the soil water storage and are therefore difficult to combine with evapotranspiration models. Lumped or semi-distributed models, which implement simpler runoff schemes like the well-known GR-models (Perrin et al., 2009), KINEROS (Woolhiser et al., 1990) or SCS-CN method (United States Department of Agriculture, 1986), are hardly appropriate at plot scale and in their original form. They cannot account explicitly for uneven surface microtopography that strongly affects surface runoff dynamics (especially combined with low-infiltrating soils), and are therefore usually unable to reproduce the complex interactions between surface runoff, ponding and infiltration at such scale.

In this study, we aim at understanding how the implementation of different farming practices affect the water balance at plot scale, and how the agricultural yield depends on the hydrological conditions and may be affected by water stress periods. For this purpose, an experimental setup combining four different water harvesting techniques was installed and extensive hydrological monitoring was performed during three consecutive years. As climate variability during rain seasons is high and the local perception seems to witness a shift of the rain season and a decrease in rainfall frequency, we also want to provide a tool that can predict the hydrological behaviour of each technique under different climatic forcing. A simple daily lumped model was developed and allows reproducing the observed runoff and simulating the other components of the water balance.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study area is the Tougou watershed (13.65°N; 2.26°E) located in the upper Nakambe River basin, Northeastern Burkina Faso. This site provides a representative study case regarding the issues raised, and has the advantage of being monitored since 2004. The Tougou watershed covers an area of 37 km² (Fig. 1). The climate is semi-arid with an average annual rainfall of 650 mm and temperature range between 18 to 40 °C during the period of 1961 to 2015. The rainy season spans from June to September with the peak rainfall generally recorded in July or August. Soils are either cultivated (essentially during the rainy season) or bare (generally because of degradation) and the vegetation consists of savannah, shrubs and grasslands (Mounirou et al., 2012).

Since 1972, a significant decrease of natural vegetation, which covered then a fifth of the watershed area, has been observed, whereas the surface of bare soils has increased (Diello, 2007). A significant loss of fertility due to the impact of increasing runoff and erosion on these bare soils has been reported in this watershed (Mounirou et al., 2012; Maïga-Yaleu et al., 2013, 2016). This decrease of arable land combined with the scarce rainfall of the last decades has encouraged more than 60% of local farmers to adopt agricultural techniques (Barbier et al., 2009; Zongo et al., 2015). In the Tougou watershed, surveys have shown that farmers combine at least two farming practices (Barbier

et al., 2009).

2.2. Experimental design

The experimental setup was installed on a bare soil that has been left uncultivated because of its productivity deficiency. The soil type is tropical ferruginous, leached with sediment and concretions (BUNAS-OLS, 2015) with an average slope of 1.33%. The soil depth profile of 120 cm can be divided in three distinct layers (Table 1). An erosion surface crust was visually identified using the method described by Casenave and Valentin (1989).

The experimental setup consists of two replicates (A and B) of a complete Fisher random block (Jayaraman, 1999). The two blocks were set up on the same geomorphological unit (crust, slope, soil type). A block is composed of four identical plots (20 m by 10 m), except for the farming practice that was implemented on each (Fig. 2). Each plot is isolated by corrugated iron sheets, vertically driven 30 cm into the soil. These sheets protrude 30 cm above the ground, preventing lateral surface runoff from one plot to the other. The plots have been designed following the recommendations of the Environmental Institute for Agricultural Research in Burkina Faso (Zougmore and Zida, 2000a,b; Zougmore et al., 2000).

The water harvesting techniques implemented are those commonly used in the watershed (Barbier et al., 2009; Zongo, 2016): stone row (T1), half-moons (T2), zaï (T3) and direct seeding (T0) which represents the control (Fig. 2). The farming practices were first implemented before the 2015 rainy season (July to October) and then rehabilitated at the same period in 2016 and 2017. The traditional direct sowing method in rows (with a small pickaxe called “daba”) is practiced on the control plot. The zaï consists of excavated holes every 80 cm distributed in staggered rows, with a diameter of 20–40 cm and a depth of 10–15 cm (about 16,000 holes per ha). The half-moons are staggered semi-circular excavations, with a diameter of 4 m and a depth of 15–25 cm (about 420 half-moons per ha). Two meters separate two half-moons on the same row, and the distance between the rows is 4 m. The excavated material from the deeper layers is used to form a bulge around the half-circle on the downstream side, while shallower excavated material is mixed with animal manure and replaced in the half-moon. The stone row consists of a line of densely packed stones buried 15 cm in the ground, perpendicular to the streamflow. The stone row is 20–30 cm high above the soil surface and 15–20 cm wide. In the 20 m long plot, only one stone row has been built 6 m upstream of the outlet (Fig. 2). Pictures of the farming practices are shown in Fig. 3.

The crop planted on all plots is a variety of millet (IKMP5, nicknamed *Kiipala*). This crop has been introduced in Burkina Faso by INERA (Institut de l'Environnement et Recherches Agricoles, Burkina Faso) for its resistance to dry spells, its earliness and a relatively short development cycle (the late season starts 70 days after sowing, instead of 80 days for conventional millet), resulting in a wide adoption by local farmers. Sowing was conducted after the first showers announcing the onset of the rainy season at regular intervals of 60 cm on each plot except on zaï, where spacing were 80 cm and distributed in staggered rows. Manure and mineral fertilizer were supplied to each plot before sowing, following the usual recommendations in practice in this area. Animal manure consisting of cow dung was applied at a dose of 35 kg (a wheelbarrow) per half-moon; an equivalent rate of 900 g of manure was supplied per zaï hole, both rates resulting in a dose of 15 t/ha also supplied to the control and stone row plots. NPK (14-23-14, 100 kg/ha) was added after the first ploughing occurring 14 days after sowing. Urea (46% N, 50 kg/ha) was added at two different dates: 30 days after sowing (corresponding to the second ploughing) and 56 days after sowing (Zougmore et al., 2004; Sawadogo et al., 2008; INERA, 2011).

2.3. Data collection and analysis

Rainfall was recorded by an automatic rain gauge (RainLogger Gold,

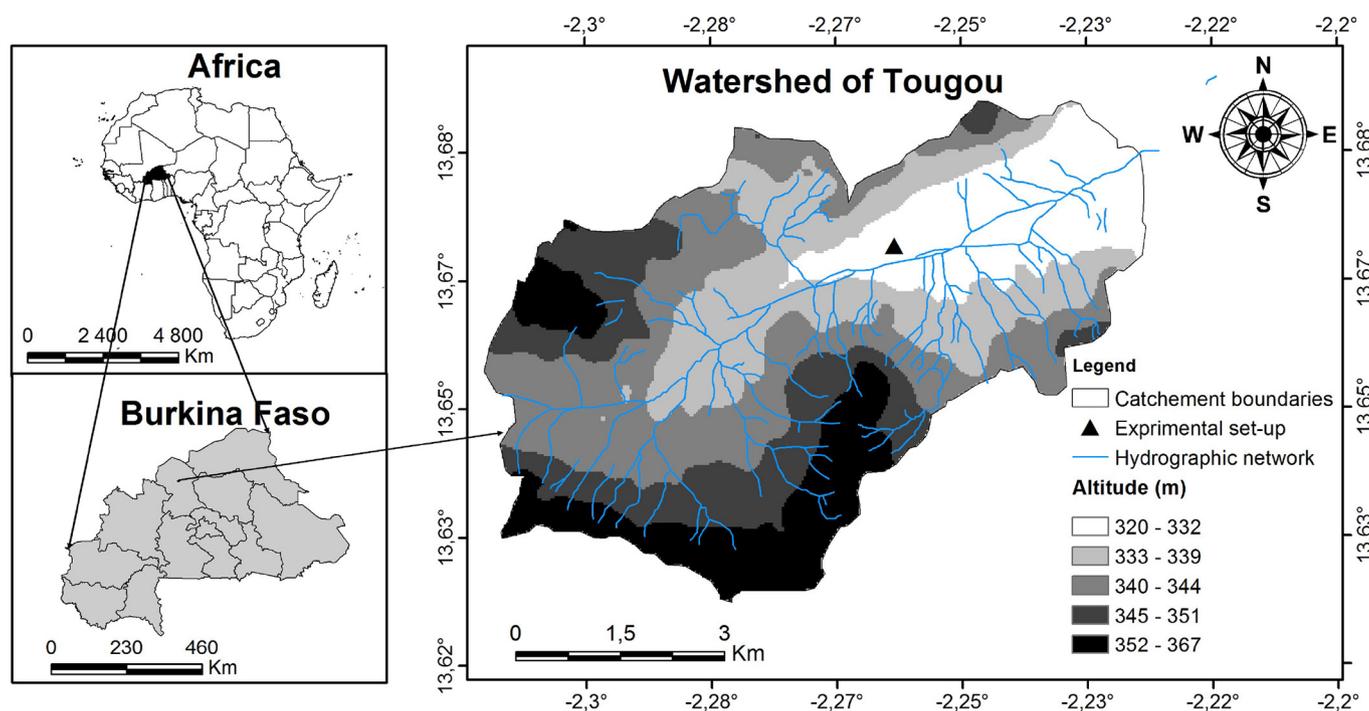


Fig. 1. Location of the experimental site in Tougou watershed, Burkina Faso.

Table 1

Soil texture, field capacity (FC), wilting point (WP) and bulk density (BD) of the experimental site (BUNASOLS, 2015).

Depth cm	Textural class (USDA)	Clay %	Silt %	Sand %	FC –	WP –	BD g/cm ³
0–22	Clay	43	22	35	0.20	0.09	1.67
22–56	Clay loam	35	22	43	0.20	0.10	1.67
56–83	Sandy clay loam	31	18	51	0.18	0.09	1.7
83–120	Sandy clay loam	31	18	51	0.19	0.09	1.74

Solinst, Canada) and validated using rainfall depths measured with a manual rain gauge. Temperature, solar radiation, wind speed and direction, air humidity, dew point and relative humidity were recorded at an hourly-timestep with a WatchDog weather station (Spectrum Technologies Inc., USA) allowing the calculation of reference evapotranspiration using the Penman-Monteith method (Allen et al., 1998). Daily evaporation was measured using a Colorado evaporation pan.

Runoff volumes were measured on each plot after each rainfall event. The outlet of each plot was connected to a circular 1 m-diameter tank fitted with 40 holes (diameter of 30 mm) drilled 500 mm above the bottom in the tank wall. A plastic pipe connected one of the hole to a buried 250-litres barrel nearby. Total runoff volume was calculated by summing up the water volume of the circular tank and the volume of water in the barrel multiplied by the number of holes.

Volumetric moisture and pressure load were measured using a moisture sensor TDR (TRIME-PICO T3/IPH44, SDEC France) and electronic tensiometer (SMS 2500S, SDEC France). Moisture and pressure head were recorded daily every 10 cm, respectively 20 cm from ground level up to 100 cm, respectively 120 cm. A moisture access tube and 5 tensiometric rods were installed in the center of each plot (i.e. outside of the zai pocket or half-moon pond). Soil saturated hydraulic conductivity was measured using a double-ring infiltrometer (SDEC France), performing triplicate measurements at different locations on each plot (inside the zai pits and half-moon ponds) before the onset of the 2015-, 2016- and 2017-rainy seasons. Infiltration test was carried

out with a constant water head of 3 cm at the ground surface until reaching the steady infiltration rate. The saturated hydraulic conductivity corresponds to the asymptote of the infiltration curve (Niang et al., 2012; Keita et al., 2014). The drainage was estimated using Darcy's equation (Darcy, 1856) at the depth of 100 cm as the rooting depth for millet should not exceed this value (Allen et al., 1998). The daily measurement of pressure head at 80 and 120 cm and the determination of unsaturated hydraulic conductivity function at the depth of 100 cm were used for drainage estimation. Drainage was finally overlooked as the measurements revealed that no or negligible drainage occurs at this depth. In 2016 and 2017, the experimental site was monitored during the complete rainfall season, i.e. from the date of seeding (2 July 2016 and 3 July 2017) to the date of harvest (16 October 2016 and 15 October 2017). In 2015, as the installation of the experimental setup was still ongoing when the rainy season set in, crop seeds were planted only on 15 July and measurements began on 10 August. Harvesting took place at the end of the rains on 12 October 2015, closing the season with a slightly shortened crop cycle.

2.4. Modified SCS-CN method for continuous water balance modelling

The USDA National Resources Conservation Service (NRCS) agency, formerly known as the Soil Conservation Service (SCS), has developed the SCS-CN approach (Mishra and Singh, 2003) which has been widely used during the last decades, also in the Sahelian context (see e.g. Peugeot et al., 1997; Gerbaux et al., 2009; Assefa et al., 2016). This method allows to evaluate the partitioning of rainfall between Hortonian overland flow and infiltration, which is supposed to be proportional to the degree of saturation of the soil, assuming a soil-specific storage capacity. The SCS-CN approach was initially developed for event-based modelling and therefore does not allow the consideration of specific initial conditions for different rainfall events. This limits the relevance of such a model in a context characterized by a large precipitation variability, because the initial soil water content can vary largely depending on the climatic conditions experienced ahead of a rainfall event. Another constraint of the SCS-CN method is that due to the lack of an explicit geometry, it cannot account in its original form for more complex surface processes than initial losses, which simply

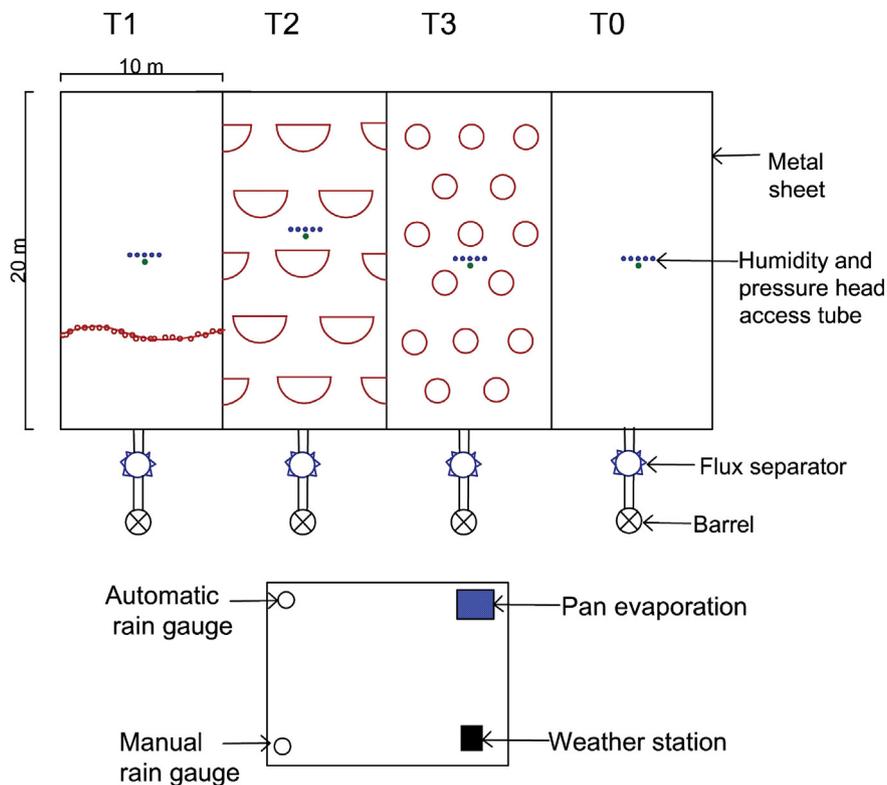


Fig. 2. Design of the experimental plot at Tougou, Burkina Faso. Only one of two replicated blocks is represented: control plot (T0), stone row (T1), half-moons (T2) and zaï (T3). Note that half-moons and zaï are not represented at scale.

slice off the earliest part of the rainfall (and are therefore definitely lost for the hydrological system). In the present study, we propose two major amendments to the original SCS-CN method in order to address the restraints critical to our case study. Firstly, as we aim at simulating the continuous hydrological fluxes during the entire rainy season and accounting for variable conditions at the onset of each rainfall event, the water storage needs to be continuously monitored. Its state relative to the maximum storage capacity can thus be used to determine the partitioning between runoff and infiltration when a rainfall event starts. This can be done by tracking incoming and outgoing fluxes of the soil, essentially infiltration and evapotranspiration. Secondly, another modification has been done to encompass more complex surface retention/detention processes induced by the layout of the water harvesting techniques. Even if the rainfall or intercepted-runoff water that ponds in the hollows on the soil surface could be viewed as initial losses according to the original SCS-CN approach (runoff is triggered once these depressions are filled), this would represent an understatement in continuous simulation. Indeed, the water stored in the hollows is partly evaporated and infiltrated over a period that could persist even after rainfall event, depending on evaporation dynamics and soil infiltration

capacity. This infiltration of ponding water also needs to be accounted for in the water storage. A schematic of the model is shown in Fig. 4.

When a rainfall event starts, the water will first completely fill the surface storage ($I_a = I_{a,max}$) before effective rainfall P_{eff} is generated. P_{eff} is then partitioned between runoff production R (Eq. (1)) and direct infiltration F_a (Eq. (2)) depending on the subsurface storage current state (Mishra and Singh, 2003):

$$R = \frac{P_{eff}^2}{P_{eff} + (S_{max} - S)} \tag{1}$$

$$F_a = P_{eff} - R \tag{2}$$

with S_{max} the maximum storage capacity and S the actual storage, expressed in mm. As the model is operated at a daily timestep, all other terms are expressed in mm/d. The difference $S_{max} - S$ corresponds to the storage capacity (usually also termed S) in the conventional SCS-CN approach. Note that Eq. (1) stems from the empirical relationship between the cumulative infiltration over the soil storage capacity and the actual cumulative runoff over the potential maximum runoff ($P - I_a$) that constitutes the basis of the SCS-CN method. In contrast to the



Fig. 3. Pictures of the farming practices at the beginning of the rainy season (28 July 2015): zaï (left), half-moons (center) and stone row (right).

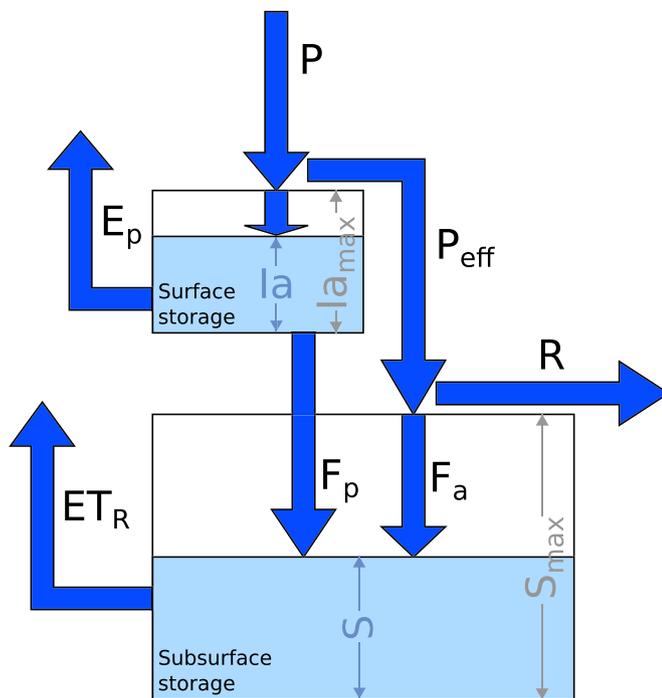


Fig. 4. Schematic representation of the processes in the conceptual model.

conventional method, runoff is recalculated here at each time step using the current value of storage. This storage is thus also recalculated at each timestep by accounting for the incoming fluxes (namely direct infiltration F_a , and pond infiltration F_p) and outgoing flux (namely actual evapotranspiration ET_R). This allows to run the model in continuous mode.

The slow draining of ponding water into the subsurface is supposed to operate at a constant rate equal to the soil saturated hydraulic conductivity measured on each plot until the surface storage runs empty.

Simultaneously to pond infiltration, free surface evaporation E_p also draws water from the surface storage as long as water is available. Surface evaporation rates are calculated from the measurements of the evaporation pan.

Finally, actual evapotranspiration ET_R uptakes water from the subsurface storage S , and therefore contributes to restore the storage capacity S_{max} (in mm) during inter-event periods. The FAO-56 Penman-Monteith method (Allen et al., 1998) has been used to calculate the reference evapotranspiration ET_0 with the data of the weather station. Crop evapotranspiration (ET_C) is further calculated by Eq. (3) and accounts for the crop-specific water requirements that depend on the development stage. The layout of the different water harvesting techniques considerably changes the effective plant density on the plot, as the spaces between the hollows are left unplanted. Hence, the equation for crop evapotranspiration reads:

$$ET_C = K_A K_C ET_0 \quad (3)$$

with ET_C and ET_0 in mm/d, and K_C the unitless crop coefficient for millet, and K_A a unitless plant density correction factor (Table 2). The model assumes that actual evapotranspiration (ET_R) operates at its maximum rate ET_C as long as water is available in the soil, i.e. as long as the soil water storage S is able to supply the demand (Eq. (4)) as suggested by Allen et al. (1998):

$$\begin{cases} ET_R = ET_C & \text{if } S \geq ET_C \\ ET_R = S & \text{if } 0 \leq S < ET_C \end{cases} \quad (4)$$

The surface storage and subsurface storage were considered completely empty at the beginning of the rainfall season, as a long dry period usually precedes the onset of the season. Note that the condition

of $S = 0$ does not necessarily imply a completely dry soil physically speaking, but rather a state where no more water can be withdrawn by evapotranspiration (corresponding to the wilting point in soil science terms) and consequently not subject to a further decrease of soil water content in natural conditions. Given the sparse requirements of the SCS-CN method in terms of parameters and the comprehensive experimental measurement setup carried out, calibration can be relatively straightforward and does not require the use of optimization algorithm. For each farming practice, $I_{a,max}$ and S_{max} need to be defined. As $I_{a,max}$ represents the threshold above which runoff is generated, or the minimum rainfall volume to produce runoff (if I_a is zero before rainfall starts), it can be directly evaluated from the rainfall-runoff experimental data. We have also assumed that the different agricultural techniques can affect the storage functions of the soil, therefore the maximum storage capacity S_{max} can be different for each technique. Thus, only S_{max} is calibrated for each technique in order to obtain the best agreement between observed and simulated runoff, as well as to increase the coefficient of determination. The other constant parameters used in the model are summarized in Table 2.

2.5. Statistics and model evaluation

A statistical Pearson's correlation test was performed using XLSTAT 2016 version to inspect the homogeneity of runoff means across replicates for pairs of identical farming practices. A Fisher test was used to estimate the equality of variances. Distribution plots (P-P plot and Q-Q plot) and normality tests (Shapiro-Wilk, Aderson-Darling and Jarque-Bera) were used for assessing the normality of the data (Ghasemi and Zahediasl, 2012), and Kruskal-Wallis test was conducted to determine if the runoff data are significantly different between the four treatments. The 5% confidence level was considered to determine statistical significance. The model performance for runoff prediction was assessed using the coefficient of determination R^2 (Moriasi et al., 2007; Foglia et al., 2009).

3. Results

3.1. Field experiments

Rainfall and runoff volumes were measured for each rainfall event during three consecutive crop growing seasons in 2015, 2016 and 2017. Seasonal rainfall and runoff statistics are summarized in Table 3. The recorded rainfall amounts during the three consecutive rainy seasons of 2015, 2016 and 2017 were 648 mm(29 events), 424 mm(33 events) and 397 mm(34 events), respectively. Most of the rainfall amount has fallen at the beginning of the season, from July to August, which represents 80% of total rainfall. In 2015, four extreme events were observed (50, 54, 68 and 124 mm), whereas only one extreme event of 59 mm was observed in 2017. In 2016, all events were less than 50 mm. The rainfall was more evenly distributed in 2015 compared to 2016 and 2017, with event inter-arrival time always shorter than a week. In contrast, three successive periods of 12–14 days without significant rainfall event (greater than 2 mm, the minimum daily evaporation) were observed in September and October 2016 (millet mid-season and late season). In 2017, two periods of 11 and 23 days in July and October 2017 (millet development and late season) occurred.

Runoff measurements were available from the second half of the 2015 rainy season (10 August) and for the entire 2016 and 2017 rainy seasons. No significant difference between block A and block B for a same treatment was revealed by the Pearson's correlation test. Coefficient of determination were consistently strong, with R^2 values above 0.9 except for half-moons ($R^2 = 0.73 - 0.95$, because of a much lower amount of runoff events observed) which indicates that the block A and B replicates were highly similar in terms of runoff production. Yet, the Kruskal-Wallis test at 5%-significance level (with Dunn's pair comparison test) showed significant differences when comparing zai

Table 2
Description of the state-independent parameters and their values for each farming practice.

	Unit	Description	Control	Stone row	Zai	Half-moons
K_{sat}	cm/h	Saturated hydraulic conductivity	3.4	3.8	6.4	1.0
A_p	–	Fraction of depression area over total plot surface	1	1	0.2	0.28
d_p	plants/ha	Areal plant density	24,200	24,200	16,350	12,600
K_A	–	Plant density correction factor	1	1	0.68	0.52
K_C	–	<i>Crop coefficient</i> (Allen et al., 1998)				
		Initial (day 0–14)			0.3	
		Development (day 15–39)			0.3–1.0 ^a	
		Mid-season (day 40–79)			1.0	
		Late-season (day 80–104)			1.0–0.3 ^b	
		After-season (from day 105)			0.3	

^a A linear increase between day 15 and day 39 is considered.

^b A linear decrease between day 80 and day 104 is considered.

Table 3
Characteristics of rainfall and runoff measured during the 2015–2017 crop growing seasons at the experimental plots. The longest inter-arrival time refers to the number of consecutive days without any significant single rainfall event (higher than 2 mm/d). Cumulative runoff represents the mean of block A and B (standard deviation in brackets) of the total runoff volume measured during a growing season for the same cultural practice.

		2015	2016	2017
Number of rainfall events (of which runoff monitored)		29 (9)	33 (33)	34 (34)
Number of rainfall events > 50 mm		4	–	1
Cumulative rainfall [mm]		648	424	397
Longest inter-arrival time [days]		6	14	23
Cumulative runoff [mm]	Control	108.7 (± 11.4)	131.9 (± 6.7)	123.7 (± 9.3)
	Stone row	103.8 (± 12.1)	81.5 (± 5.9)	94.0 (± 8.1)
	Zai	78.3 (± 12.2)	58.1 (± 5.5)	61.6 (± 8.4)
	Half-moon	16.3 (± 3.0)	4.9 (± 0.2)	5.9 (± 0.6)
Runoff reduction factor (relative to the control plot)	Stone row	4.5 %	38.2 %	24.0 %
	Zai	27.9 %	56.0 %	50.2 %
	Half-moon	85.0 %	96.3 %	95.3 %

and half-moons with the control (p -values < 0.0001), but not between stone-row and the control (p -value = 0.072). Hence, and for the sake of conciseness, we will only refer to block A in the following. Fig. 5 shows the distribution of runoff event volumes of each farming practice during the crop growing seasons from 2015 to 2017. Median runoff is reduced from 8.4 mm for the control plot to 4.3 mm for the stone row and 2.1 mm for the zai. Runoff was found to be very low (volumes below 0.7 mm) on half-moon plots for rainfall events below 50 mm. As compared to the control plot, cumulative runoff values of the growing seasons 2016 and 2017 were reduced by a factor of 24–39 % for the stone row, 50–56 % for the zai and 95–97 % for the half-moons (Table 3). It can be noticed that in 2015, runoff reduction factor of all techniques, but in particular stone row and zai, are much lower than for the following years. This can be explained by the occurrence of larger rainfall events observed during a shorter monitored period in 2015 (more than 25 mm were measured for 4 out of 9 events) that have triggered especially large amount of runoff. In addition, the efficiency of cultural practices has been shown to increase with time after their installation, which could also explain the higher runoff reduction observed in 2016 and 2017 (Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2014).

Saturated hydraulic conductivity measurements were conducted on each plot before the onset of the rainy season 2015, 2016 and 2017 (i.e. on dry soils). They are shown in Table 4. Before the rainy season of

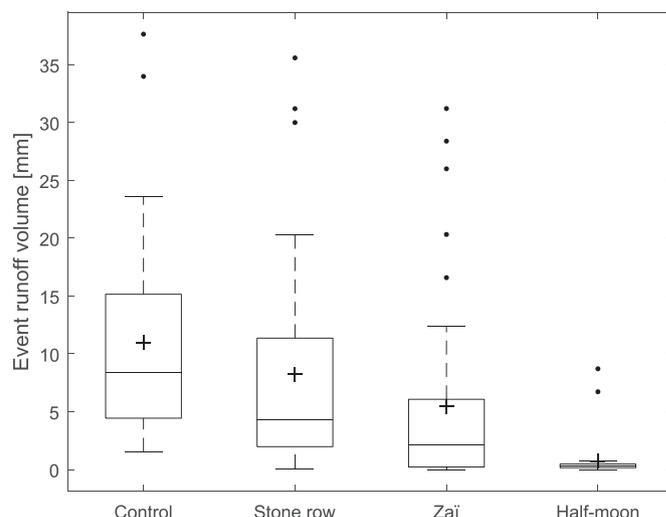


Fig. 5. Box plots of the event runoff volume for 2015, 2016 and 2017 combined (36 events). The box's upper and lower edges represent the 25%- and 75%-quartile. The middle line is the median and the + symbol the mean. The whiskers extend up to the last value smaller (respectively larger) than the third (respectively first) quartile plus 1.5 times the interquartile distance. The dots represent all the data out of the range defined by the whiskers.

Table 4
Mean and standard deviations of the saturated hydraulic conductivity measured on the experimental plots in April 2015, 2016 and 2017.

K_{sat} [cm/h]	2015	2016	2017
Control	4.0 (± 0.7)	3.4 (± 0.5)	4.7 (± 0.6)
Stone row	4.3 (± 0.9)	3.8 (± 0.9)	3.5 (± 0.1)
Zai	4.5 (± 0.3)	6.4 (± 0.4)	7.2 (± 1.1)
Half-moon	3.9 (± 0.2)	1.1 (± 0.3)	1.2 (± 0.4)

2015, the values of hydraulic conductivities were similar for the control, stone row, zai and half-moon plots (around 4.2 cm/h) as the plots were installed on the same soil with no prior agricultural techniques. However, hydraulic conductivities have likely been impacted by the farming practices reinstated during the two following seasons 2016 and 2017, as their values show an increase in the zai pits (7.2 cm/h in 2017), compared to the control and stone row plots where hydraulic conductivities have not changed significantly (4.7 and 3.5 cm/h in 2017, respectively). In contrast, saturated hydraulic conductivity in half-moons has considerably decreased as low as about 1.1 cm/h.

Daily measurements of soil moisture profiles on each plot throughout the rainy season also depict some influence of the farming practices on infiltration dynamics (Fig. 6). On the control plot, soil moisture varied between 10 and 23%, but this variation was limited to

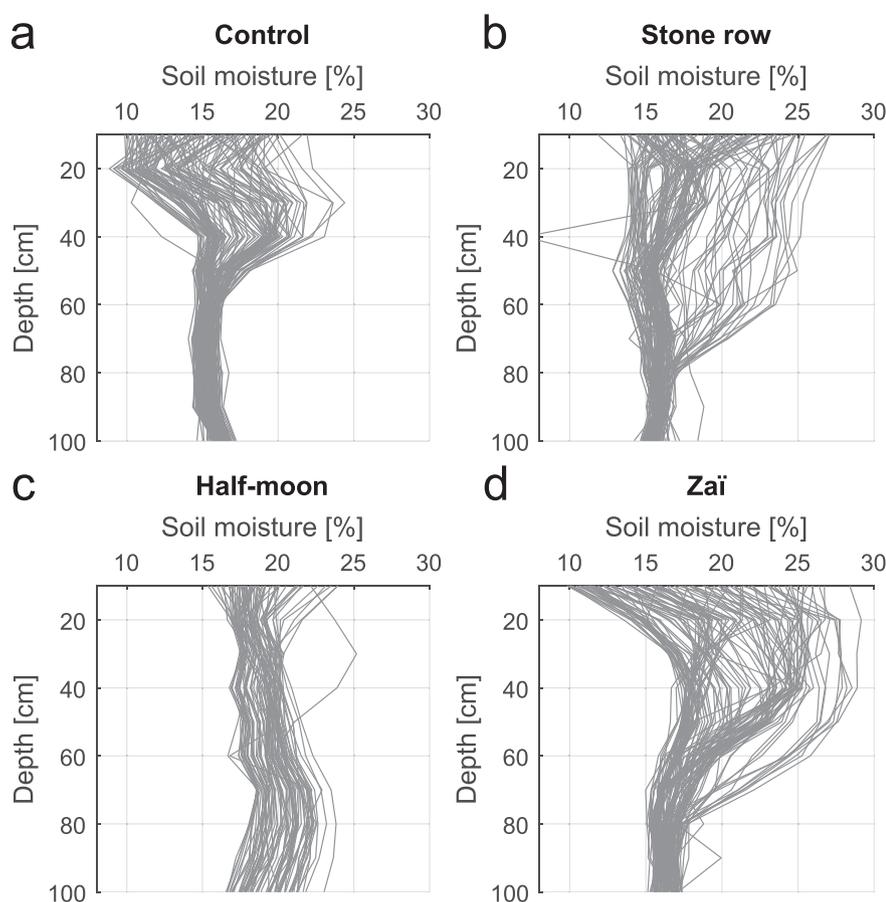


Fig. 6. Overview of the temporal evolution of water profiles for each type of farming practice. Each grey line represents the soil moisture profile from ground level to 1 m depth measured on a specific day during the 2016 rainy season (block A). The profiles were measured between the rows of zaï and half-moons (and 1 m upstream of the stone row) and may not be representative of the profiles that would be observed under the hollows of zaï and half-moons (or farther from the stone row).

a depth of 50 cm. On the zaï and stone row plots, the wetting front depth reached 80 cm illustrating an enhanced infiltration capability, with higher soil moisture values between 20–60 cm below the soil surface. In the half-moon plot, the evolution of soil moisture profiles was different, with a strongly reduced variability at the surface and at shallow depths, but with a slightly larger variability beyond 60 cm. Note that the profiles are not directly measured inside the hollows, but between the rows. Hence, it has been observed that half-moons have very limited impact on soil moisture if not directly under a pond. As the hydraulic conductivity is low and the ponds are widely spaced, lateral transfer is not significant, and a soil profile measured between two half-moon may be much drier than a profile measured below a pond. The key mechanism of half moons reside in their ability to retain important volumes of intercepted surface runoff in the ponds, which infiltrate slowly, but for extended durations. This provides a more constant and consistent water supply to the soil that can therefore reach deeper soil depths.

3.2. Model parameters optimization for runoff simulation

The model was calibrated with the 2016 observed runoff data using the parameters presented in Table 2. The two main technique-specific parameters for the modified SCS-CN model are surface storage capacity $I_{a,max}$ and maximum storage capacity S_{max} . As the model assumes that surface storage must be completely filled before infiltration and runoff can be produced (Section 2.4), $I_{a,max}$ can be set to the precipitation threshold that should be exceeded to trigger runoff. This threshold is directly deducted from the observations as the smaller precipitation volume among all recorded events in 2016 that generates a significant runoff. Hence, the values used were 7, 10, 20 and 50 mm for control, stone row, zaï and half-moon plots respectively (see Section 3.1). Our previous observations suggest that farming practices increase

hydrodynamic properties of the soil surface, promoting a higher infiltration and sustaining an improved soil water storage. Hence, S_{max} has been calibrated independently for each farming practice in order to provide the best agreement between observed and simulated runoff volumes (see Section 2.4). Calibrated values for S_{max} were 35, 40 and 70 mm for control, stone row and zaï respectively. As half-moon plots have not generated any sizable runoff event, calibration and validation were not possible. It has thus been assumed a maximum storage S_{max} value of 70 mm, corresponding to the largest storage capacity observed among the other plots. Fig. 7b shows the rainfall timeseries and the observed and simulated runoff response for each agricultural practice. It can be observed that both the occurrence of runoff events and their magnitude are adequately reproduced, and the variability among the practices is closely grasped by the model. Observed runoff and climate data from the 2015 and 2017 campaigns were used for model validation using the same parameters as for 2016. The 2017 simulations also perform satisfactorily, with a good predictability of runoff occurrence and volumes for the three practices (R^2 varies between 0.87 and 0.95). The 2015 simulations are represented in Fig. 7a. They are also accurate, albeit the season has been much wetter than in 2016 and 2017 with intense rainfall events and large runoff volumes (note the different rainfall and runoff scales between 2015 and 2017 in Fig. 7).

3.3. Effect of farming practices on soil water storage and dry spell mitigation

Besides simulating runoff, the modified SCS-CN model can be used to evaluate the impact of farming practices on the soil water dynamics, because the model is continuous and accounts for storage recharge and uptake. Fig. 8 shows the state of the soil water storage for the three consecutive years and each farming practice. Overall, soil water storage (SWS) is higher for half-moons, followed by zaï, stone row and finally the control plot, which endorses the differences in runoff generation

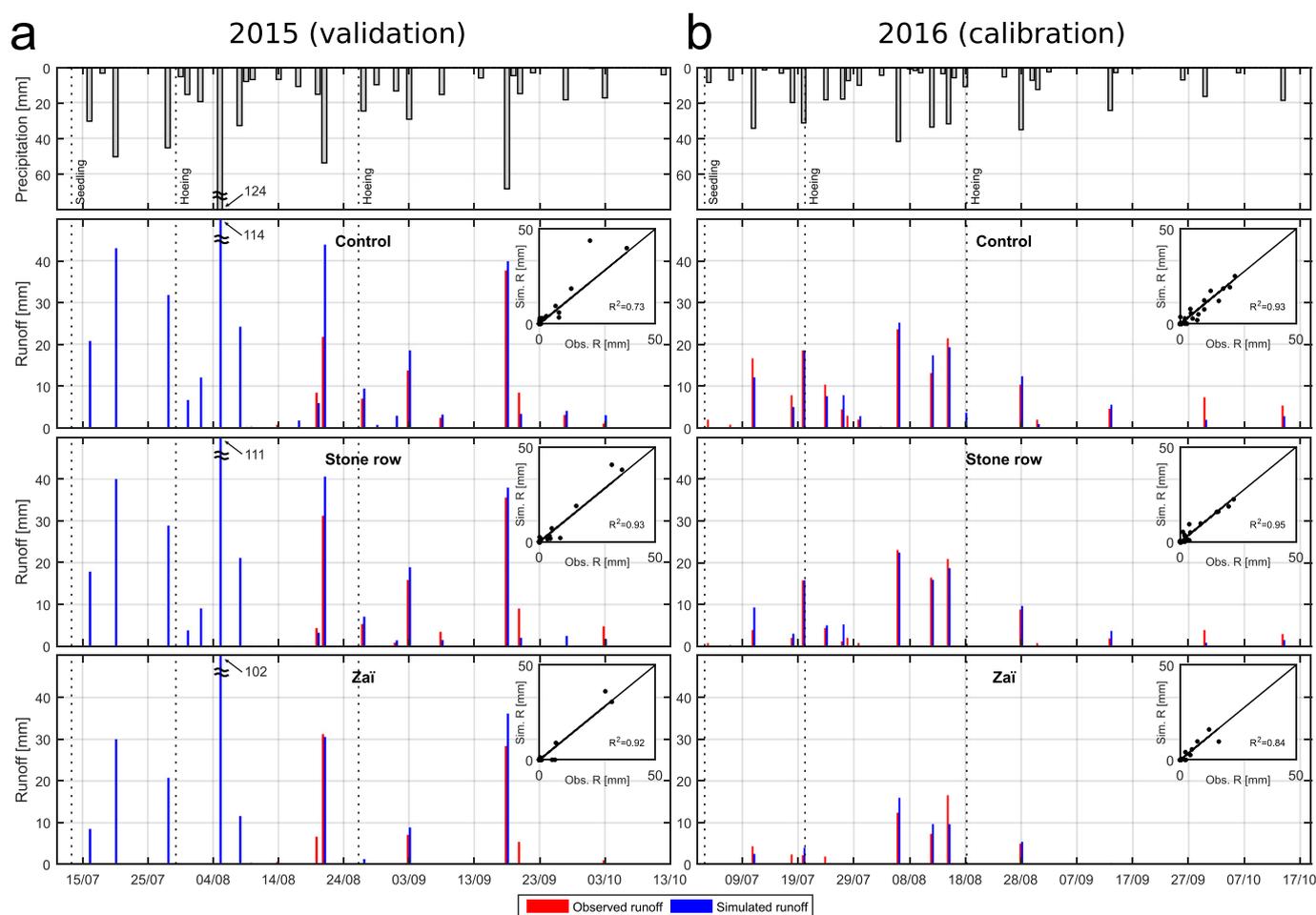


Fig. 7. Observed and simulated runoff in 2015 (validation period) and 2016 (calibration period). Only the control plot, stone row and zaï are represented, as no runoff was observed on half-moons. The insets illustrate the correspondence between observed and simulated runoff and indicate the goodness of fit. Note that in 2015, runoff was measured only since 10 August. Data from 2017 are not represented here, as the rainfall regime and runoff responses were similar to 2016.

observed earlier. In 2015, the abundant and well-distributed rainfall has allowed sustaining the SWS throughout the season for all plot types (Fig. 8a). Thus, evapotranspiration has not been limited at any time. This suggests that the hydrological requirements were met this year, even without the aid of a farming practice. The situation was different in 2016, as rainfall was sparse and unevenly distributed throughout the second half of the rainy season as opposed to year 2015 (Fig. 8b). The SWS of the control and stone row plots have run dry four times and three times respectively, preventing water uptake from the crop. The three last dry spells (65, 77, 93 days after sowing, DAS) may have been particularly harmful for the yields because they lasted for more than a week. In contrast, the zaï and half-moon plots have been able to store enough water to overcome these dry spells and provide enough water for the plants. In total, the control plot and the stone row plot have faced 35 and 31 days (respectively) with dry storage, resulting in a plant water deficit over the season of 117 mm (respectively 105 mm). During 2017, the SWS could not be fully replenished early in the season like in 2015 and 2016 due to limited rainfall at this time, as shown in Fig. 8c. As such, SWS of all practices was low until 30–40 DAS and even occasionally dried up for short periods in the control plot. Still in the same year, right after the SWS of all plots was at full capacity (just before 40 DAS), short dry spells occurred, resulting in two small rainfall events of less than 5 mm in 11 days. As a consequence, the higher storage capacity combined to a smaller evapotranspiration demand on half-moon and the zaï plots (with respect to their smaller crop density) prevented the SWS from drying up for a longer period than the control and stone row plots, as pictured in Fig. 8c. This period has led to a water

shortage of one day only for the control plot, after which abundant rainfall has fully replenished the SWS of all plots. Very sparse precipitation occurred during the late season (after 75 DAS), inducing the complete dry up of the control and stone row storage during 16 and 14 days (respectively) until the harvest. In 2017, zaï and half-moon techniques were again able to mitigate efficiently the effects of rain scarcity and losses through surface runoff. The control and stone row plots have experienced 25 and 17 days (respectively) of water shortage leading to a total plant water deficit of 58 and 44 mm (respectively).

Fig. 9 compares the amount of time (fraction of the total duration of the season) during which a given value of SWC has been exceeded among the farming practices and between 2015 and 2016. The distribution of the SWS were very different between the two seasons: in 2015, the SWS was filled beyond half-capacity during almost 90% of the season for all plots, whereas half-capacity was exceeded during less than 40% of the time (for control and stone row) to 70% of the time (for half-moon). Moreover, the SWS was never totally emptied for any technique in 2015. Dry storage had occurred during about 30% of the crop season in the control and stone row plots in 2016, whereas zaï and half-moons have undergone low storage periods, but have barely dried up completely. This demonstrates the efficiency of agricultural techniques (in particular zaï and half-moons) in maintaining available water in the storage to overcome dry spells, but it also shows the sensitivity of these complex hydrological systems to the climatic forcing.

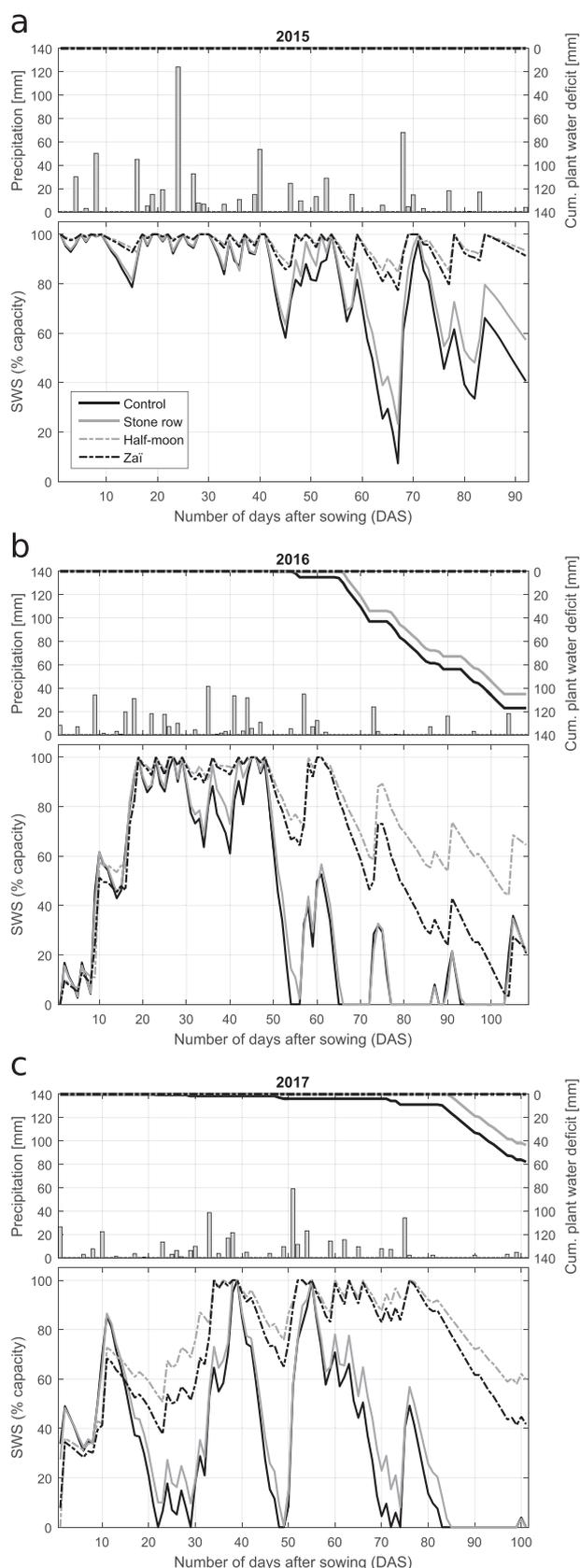


Fig. 8. Evolution of rainfall and modelled soil water storage during the rainy season 2015 (a), 2016 (b) and 2017 (c) for the control, stone row, zaï and half-moons. The curves on top of the precipitation bars represent the cumulative plant water deficit, i.e. the difference between the cumulative crop evapotranspiration and the cumulative actual evapotranspiration.

4. Discussion

The good performance of the model at reproducing observed runoff during of the calibration (2016) and validation datasets (2015 and 2017) can be attributed to its ability to grasp the different dynamics of the relevant hydrological processes that characterized each type of plot configuration. In particular, the amendments provided to the original SCS-CN method allows to account explicitly for a surface storage that mimics the retention of water in puddles shaped by the different types of agricultural practices. These large differences of surface retention capacities are responsible for a great part of the runoff variability observed. It should be reminded that the surface retention capacity parameter ($I_{a,max}$) is not calibrated but directly derived from the rainfall-runoff data. Their respective values for the zaï and half-moon plots can also be retrieved by calculating the total volume of the depressions divided by the plot surface. This demonstrates the physical and measurable interpretation of this parameter, which would support the relevance of the model as a predictive tool to simulate the effect of different geometries of the farming practices (as long as the total volume of the depression storage can be easily measured or estimated). It should be emphasized that the model assumes the complete filling of the surface storage before direct infiltration and runoff are triggered. Even if this surface storage has a similar effect as the initial abstraction defined by the conventional SCS-CN method, this surface storage later actively contributes to the recharge of the subsurface storage unlike initial abstraction. The magnitude and the dynamics of this recharge is driven by evaporation and pond infiltration rates, allowing potentially its extent over several days after the end of a rainfall event for some cases (like half-moons). The accounting of these processes allows the prediction of the specific soil moisture conditions prevailing before each rain event, which highly contributes to the capability of the model at reproducing the variability of runoff volumes. The saturated hydraulic conductivities measured on each plot were used as pond infiltration rates. These values seem to be overestimated, as the model did not show the persistence of water in the surface storage for more than one day, whereas field observations have demonstrated occasional water stagnation during up to four days in the half-moons. However, this situation does not have noticeable effect on the simulations presented here, because only half-moons have demonstrated water retention on longer timescales than one day while the model works at the daily timestep. Hence, for the other techniques, overestimation of pond infiltration does not change the overall dynamics of surface water, but only the partitioning of surface water between evaporation and infiltration (however only to a negligible extent). For half-moons, the overestimation of pond infiltration rate may lead to the underestimation of evaporation fraction in favour of infiltration, therefore unduly inflating the subsurface storage. This could not be evaluated as virtually no runoff has been observed on half-moon plots.

The different values of S_{max} for each type of plots suggest that the agricultural practices induce various changes to the soil hydraulic properties, as all plots were initially set up on the same soil. Even if other observations (discussed hereafter) qualitatively support this assumption, it has to be mentioned that simulated runoff and soil water storage are not very sensitive to this parameter, as the magnitude of runoff is mostly controlled by the surface storage capacity. Assuming a constant subsurface capacity for all farming practices would have conducted to a reasonable model fit.

As our model is based on the well-established FAO evapotranspiration model, a theoretical crop development is taken into account based on the typical duration of each development stage (affecting the value of the crop coefficient K_C). Hence, even if evapotranspiration can be reduced or cancelled during water shortage, plants repeatedly exposed to dry spells are assumed to resume evapotranspiration at the same rate as if no stress had been experienced once water becomes available again. In reality, long or frequent water stress periods affect the plant development, as it has been clearly observed for

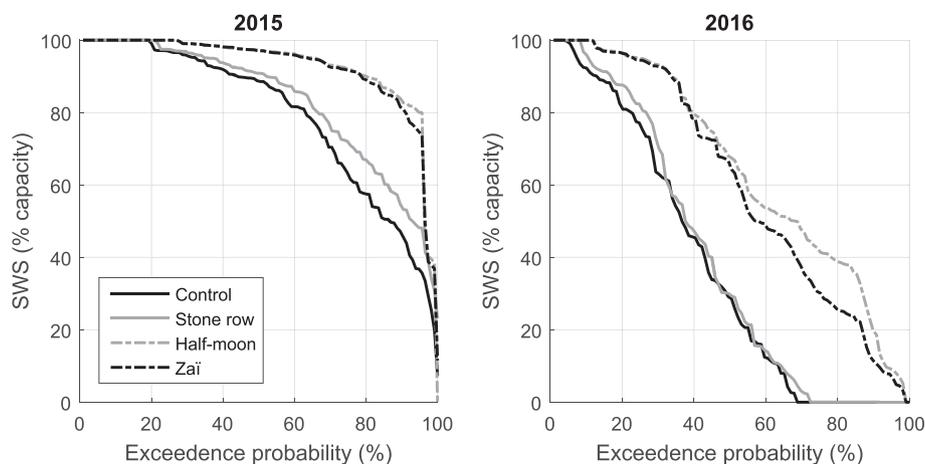


Fig. 9. Exceedance probability of soil water storage in 2015 and 2016 for the four plot types. The exceedance probability curves for 2017 (not represented) are very similar to 2016.

the control and stone row plots. Actual evapotranspiration would be reduced compared to continuously well-watered crops. In our model, this weakness leads to an overestimation of the plant water requirements for the control and stone row plots once the crops have accumulated a development gap, thus potentially anticipating the start of dry spells and increasing their frequency.

The better hydrologic conditions provided by the farming practices are also clearly transcribed in higher crop yields during the three years. Table 5 shows the effective grain yield for each plot. We notice that crop yields are systematically higher in 2015 compared to 2016 and 2017, even if we could have expected increasing efficiency several years after the installation of the practices, as suggested by many authors (Zougmore et al., 2003b; Barry et al., 2009; Bayala et al., 2011). Despite the late sowing and crop installation in 2015, the abundant and well-distributed rainfall has ensured the plant water demand even without the help of farming practices (Fig. 8a). Only the half-moon plots have provided sufficient water storage in order to foil the recurrent water stresses observed in 2016 and to prompt higher yields than those observed in 2015. The harvests are also slightly better in 2016 than in 2017, except for the zaï plots. The rainfall amount of these years are similar, however the rainfall was more evenly distributed in 2016, especially during the early stage of the season. The first stress period occurs around 55 DAS in 2016, whereas water deficit is already observed after 22 DAS in 2017 (Fig. 8a–b), which could have induced a detrimental development delay. In addition, Doto (2016) has shown that stress periods arising at the late season during the grain-filling period can strongly affect the grain yield, even when the plant development has not been disturbed. This is especially relevant in 2017, as after the rainfall event that has occurred 70 DAS, there was no further significant rainfall until harvest (Fig. 8c).

The grain yields shown in Table 5 give evidence of the efficiency of the agricultural techniques, as it has also been reported by Araya et al. (2015). Looking at each year individually, these results support the main outcomes of the hydrological assessment, with stone rows providing a slight improvement in terms of runoff reduction and soil water

availability compared to the control. Zaï and half-moon plots allow the mitigation of almost all dry spells by retaining water at the surface and strongly reducing runoff. However, it can also be noticed that securing water availability for the plants is not the sole benefit of these water harvesting techniques. Even when the rainfall amount seems to satisfy the plant water requirements without the need of farming practices like in 2015, the stone row, zaï and half-moon plots still provide a sizeable increase in yields.

Several factors can explain the high yields of the water harvesting techniques in regards to the control. Indeed, also in 2015 when no significant water stress has been noticed even on the less efficient techniques, the grain yields were much higher for zaï and half-moons. However, in addition to providing better hydrologic conditions through a modification of the water balance, farming practices also allow to retain more efficiently the organic amendments that stay in their vicinity instead of being rapidly washed out (Zougmore et al., 1993; Zougmore et al., 2004; Kiema et al., 2008). Avoiding this amendment loss could significantly raise the grain yield (Zougmore et al., 2014; Suzuki et al., 2016). In addition, improving the soil moisture conditions and increasing the active soil depth (see Fig. 6) can enhance root development and induce significant changes in soil physical, chemical and microbiological properties, eventually enhancing infiltration, aeration and soil nutrient availability. For example, Kaiser et al. (2017) have reported a large activity of termites in zaï fields. The furrows dig by the termites act as preferential flow pathways, hence drastically increasing infiltration. These feedback effects of farming practices on soil properties justify accounting for a technique-specific storage capacity in our model, as it has also been recognized by Soulis and Valiantzas (2012). The use of these techniques can in the longer term (usually five years) lead to the full restoration of soil and alleviate any further need of farming practices (Roose et al., 1995; Zougmore et al., 2014).

In this study, some of these feedback effects of farming practices on soil properties have been detected, notably in the changes of measured saturated hydraulic conductivities or the enhanced termite activity on the zaï plots. The erosion crust that initially existed on each plot has persisted on the control and stone row plots, but seems to be averted by the presence of zaï pits that prompt higher hydraulic conductivities throughout the years. Nonetheless, even though half-moons have always come out as the best option both in terms of hydrological and agricultural performances, these slow changes induced by the technique appear to be more detrimental than favourable in the long run. Indeed, half-moon saturated hydraulic conductivities have decreased from year to year, and were the smallest of all experimental plots in 2017. In addition, a decantation crust develops during the rainy season inside the half-moons, and termite activity is strongly reduced (as reported by Fatondji et al., 2009). These changes may be attributed to the large

Table 5
Millet grain yield on the experimental plots in 2015, 2016, 2017.

	Grain yield (kg/ha)		
	2015	2016	2017
Control	252.5	176.3	164.2
Stone row	710.6	661.8	571.8
Zaï	1438.1	972.7	1091.4
Half-moon	1944.0	2177.3	1453.9

retention capacity of the half-moons, which can hold water during extended periods and may be more prone to clogging through the slow deposition of fine particles. Moreover, this ponding effect leaves the crop base immersed, which is likely to be harmful for the plants if immersion persists for too long. This may also explain the significant reduction of grain yield between 2016 and 2017, whereas those of the zaï plots show a slight increase.

It has been shown that the capacity to provide a water supply that meets the crop requirements even during dry spells is a prerequisite for a successful agricultural technique. However, the design and sizing of these techniques should be carefully adjusted to the local climatic conditions in order to provide this necessary supply at any time while avoiding the creation of adverse conditions in the longer term. In the future, more efforts will be needed in order to understand better the response of soil physical, chemical and biological properties to the hydrological conditions prompted by the nature of the water harvesting techniques.

5. Conclusion

The field experiments conducted in the Burkina Faso Sahel have demonstrated the runoff reduction potential of water harvesting techniques, in particular zaï and half-moons. The parsimonious model developed performed well at reproducing the observed runoff under different rainfall regime without recalibration between the seasons. It has also allowed providing an assessment of the soil water dynamics, which prove very different between the types of techniques, but also highly conditioned by the precipitation distribution during the growing season. Zaï and half-moons were able to sustain sufficient water available for the crops even during the longer dry spells, whereas stone row and direct sowing without any specific farming practice experience several days of dry storage leading to substantial plant water deficits at the end of bad seasons. Our model can be used as a decision-making tool to evaluate the performance of a variety of farming practices under different climatic regimes.

These farming techniques allow ensuring a constant water availability for crop, which obviously appears as a prerequisite for optimal plant development and for securing decent yields. However, our study also gave some insights on some other effects induced by the changes of hydrological conditions. Some of these outcomes seem to have immediate effects on crop health as the impediment of amendment leaching through runoff, but other operate on the longer term and can affect soil physical, chemical and biological properties. These feedbacks will require more attention in order to improve soil management under a climate change perspective and to propose optimize farming practices for specific contexts.

Acknowledgments

This research was carried out at the International Institute for Water and Environmental Engineering (2iE foundation) of Burkina Faso and at the Institute of Territorial Engineering INSIT, School of Business and Engineering Vaud (HEIG-VD), University of Applied Sciences, Switzerland. Financial support has been provided by the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) [grant Projet 3E Afrique, Burkina Faso – 2iE, partie scientifique]. We are also thankful to the local communities in the Tougou watershed for their kind cooperation.

References

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. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Araya, T., Nyssen, J., Govaerts, B., Deckers, J., Cornelis, W.M., 2015. Impacts of conservation agriculture-based farming systems on optimizing seasonal rainfall partitioning and productivity on vertisols in the Ethiopian drylands. *Soil Tillage Res.* 148, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.11.009>.

Assefa, S., Biazin, B., Muluneh, A., Yimer, F., Haillessie, A., 2016. Rainwater harvesting for supplemental irrigation of onions in the southern dry lands of Ethiopia. *Agric. Water Manag.* 178, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.012>.

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. *Environ. Manag.* 43, 790–803. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9237-9>.

Barry, B., Olaleye, A.O., Zougmore, R., Fatondji, D., 2009. *Rainwater Harvesting Technologies in the Sahelian Zone of West Africa and the Potential for Upscaling*. 126 IWMI.

Bayala, J., Kalinganire, A., Tchoundjeu, Z., Sinclair, F., Garrity, D., et al., 2011. *Conservation Agriculture With Trees in the West African Sahel—A Review*. ICRAT occasional paper. 14.

BUNASOLS, 2015. *Caractérisation Des Sols Du Site de Tougou*. Technical Report. Bureau National des Sols, Ouagadougou, Burkina Faso.

Casenave, A., Valentin, C., 1989. *Les États de Surface de La Zone Sahélienne: Influence Sur l'Infiltration*. Paris, France. Collections Didactiques. éditions de l'orstom ed.

Da, C.É.D., 2008. Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur le rendement du sorgho au centre-nord du Burkina Faso. *Les Cahiers d'Outre-Mer.* 61. pp. 99–110. <https://doi.org/10.4000/com.3512>.

Danjuma, M., Mohammed, S., 2015. Zai pits system: a catalyst for restoration in the dry lands. *J. Agric. Vet. Sci.* 8, 1–4.

Darcy, H., 1856. *Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon: Exposition et Application...* Victor Dalmont.

Diello, P., 2007. *Interrelation Climat-Homme-Environnement Dans Le Sahel Burkinabé: Impacts Sur Les États de Surface et La Modélisation Hydrologique*. SIBAGHE - Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences et Environnement. Sciences et Techniques du Languedoc. Université de Montpellier II, Montpellier, France.

Doto, V.C., 2016. *L'irrigation de Complement à Partir de Petits Bassins Individuels En Zone Sahélienne Burkinabé : Impact Sur La Production Des Exploitations Agricoles Familiales*. Ph.D. thesis. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.

Duponnois, R., Dia, A., 2013. *La Grande Muraille Verte: Capitalisation Des Recherches et Valorisation Des Savoirs Locaux*. IRD.

Esteves, M., Faucher, X., Galle, S., Vauclin, M., 2000. Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed values. *J. Hydrol.* 228, 265–282. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00155-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00155-4).

Fatondji, D., Martius, C., Zougmore, R., Vlek, P.L.G., Biellers, C.L., Koala, S., 2009. Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 85, 225. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9261-z>.

Fiedler, F.R., Ramirez, J.A., 2000. A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 32, 219–239.

Foglia, L., Hill, M.C., Mehl, S.W., Burlando, P., 2009. Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resour. Res.* 45.

Gerbaux, M., Hall, N., Dessay, N., Zin, I., 2009. The sensitivity of Sahelian runoff to climate change. *Hydrol. Sci. J.* 54, 5–16. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.5>.

Ghasemi, A., Zahediasl, S., 2012. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *Int. J. endocrinol. Metab.* 10, 486.

INERA, 2011. *Fiche Technique Variétale de Mil*.

Jayaraman, K., 1999. *Manuel de Statistique Pour La Recherche Forestière*. FAO, European Commission and Netherland Development Cooperation. Kerala Forest Research Institute, Peechi, India.

Kaiser, D., Lepage, M., Konaté, S., Linsenmair, K.E., 2017. Ecosystem services of termites (Blattoidea: Termitoidea) in the traditional soil restoration and cropping system Zaï in northern Burkina Faso (West Africa). *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.023>.

Keita, A., Yacouba, H., Hayde, L.G., Schultz, B., 2014. Comparative non-linear regression - case of infiltration rate increase from upstream in valley. *Int. Agrophys.* 28. <https://doi.org/10.2478/intag-2014-0020>.

Kiema, A., Nianogo, A.J., Ouedraogo, T., 2008. Effets des cordons pierreux sur la régénération d'un pâturage naturel de glaciés au Sahel. *Cah. Agric.* 281–288. <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0204>.

Kpadonou, R.A.B., Owiyo, T., Barbier, B., Denton, F., Rutabingwa, F., Kiema, A., 2017. Advancing climate-smart-agriculture in developing drylands: joint analysis of the adoption of multiple on-farm soil and water conservation technologies in West African Sahel. *Land Use Policy* 61, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.050>.

Mahé, G., Paturel, J.E., 2009. 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Compt. Rendus Geosci.* 341, 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.05.002>.

Maïga-Yaleu, S., Guiguemde, I., et al., 2016. Hydrochimie des eaux de pluie et de ruissellement en région Sahélienne Hydrochemistry of rainwater and runoff in Sahel region. *J. Soc. Ouest Afr. Chim.* 42, 16.

Maïga-Yaleu, S., Guiguemde, I., Yacouba, H., Karambiri, H., Ribolzi, O., Bary, A., Ouedraogo, R., Chaplot, V., 2013. Soil crusting impact on soil organic carbon losses by water erosion. *CATENA* 107, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.006>.

Maïsharou, A., Chirwa, P., Larwanou, M., Babalola, F., Ofoegbu, C., 2015. Sustainable land management practices in the Sahel: review of practices, techniques and technologies for land restoration and strategy for up-scaling. *Int. For. Rev.* 17, 1–19. <https://doi.org/10.1505/146554815816006974>.

Mishra, S.K., Singh, V.P., 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Water Science and Technology Library. 42 Springer, Dordrecht,

- Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900.
- Mounirou, L.A., Yacouba, H., Karambiri, H., Paturel, J.E., Mahé, G., 2012. Measuring runoff by plots at different scales: understanding and analysing the sources of variation. *Compt. Rendus Geosci.* 344, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.08.004>.
- Mügler, C., Planchon, O., Patin, J., Weill, S., Silvera, N., Richard, P., Mouche, E., 2011. Comparison of roughness models to simulate overland flow and tracer transport experiments under simulated rainfall at plot scale. *J. Hydrol.* 402, 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.032>.
- Niang, D., Mermoud, A., Yacouba, H., Ribolzi, O., 2012. Temporal evolution of the hydrodynamic behaviour of sandy deposits in the Sahelian part of Burkina Faso. *J. Soil Sci. Environ. Manag.* 3, 297–307.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2009. A set of Hydrological Models (Chapter 16). In: *Environmental Hydraulics*, John Wiley and Sons. vol. 279 of ISTE Ltd. J. M. Tanguy, Paris, pp. 439–509.
- Peugeot, C., Esteves, M., Galle, S., Rajot, J.L., Vandervaere, J., 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. *J. Hydrol.* 188, 179–202.
- Reij, C., Tappan, G., Smale, M., 2009. Agroenvironmental Transformation in the Sahel: Another Kind of “Green Revolution”. IFPRI Discussion Paper 00914. International Food Policy Research Institute.
- Rockström, J., Folke, C., Gordon, L., Hatibu, N., Jewitt, G., De Vries, F.P., Rwehumbiza, F., Sally, H., Savenije, H., Schulze, R., 2004. A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through water system innovations: an integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 29, 1109–1118.
- 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). In: *L'homme Peut-Il Refaire Ce Qu'il a Défait ?*. number 1994/11/14-19 in Congrès International sur la Restauration des Terres Dégradées, des Zones Arides et Semi-Arides, Tunis (TUN), pp. 249–265.
- 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). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 12, 279–290.
- Soulis, K. ×., Valiantzas, J.D., 2012. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds - the two-CN system approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1001–1015. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012>.
- Suzuki, K., Matsunaga, R., Hayashi, K., Matsumoto, N., Tobita, S., Bationo, A., Okada, K., 2016. Long-term effects of fertilizer and organic matter application on millet in Niger. *Agron. J.* 108, 873. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0375>.
- United States Department of Agriculture, 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Report TR-55. Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- Woolhiser, D., Smith, R., Goodrich, D., 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. Technical Report ARS-77. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Zongo, B., 2016. *Stratégies Innovantes d'adaptation à La Variabilité et Au Changement Climatiques Au Sahel: Cas de l'Irrigation de Complément et de l'information Climatique Dans Les Exploitations Agricoles Du Burkina Faso*. Ph.D. thesis. Université de Liège, Belgique.
- Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T., 2015. Farmers' perception and willingness to pay for climate information in Burkina Faso. *J. Agric. Sci.* 8, 175. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n1p175>.
- 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. *Agric. Food Secur.* 3, 16. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-3-16>.
- Zougmore, R., Kambou, N., Guillobez, S., 1993. Première approche de l'impact des ouvrages anti érosifs en pierre sur le ruissellement et les rendements en sorgho: Etude des écartement sur un bassin versant dans le plateau central. In: *Gestion Durable Des Sols et Environnement En Afrique Intertropicale*, pp. 278–283 Ouagadougou, Burkina Faso.
- Zougmore, R., Mando, A., Ringsersma, J., Stroosnijder, L., 2003a. Effect of combined water and nutrient management on runoff and sorghum yield in semiarid Burkina Faso. *Soil Use Manag.* 19, 257–264. <https://doi.org/10.1079/SUM2003199>.
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, N., 2003b. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil Tillage Res.* 71, 143–149. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00050-3).
- Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, L., 2004. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil-plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agric. Water Manag.* 65, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.07.001>.
- Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, L., Ouédraogo, E., 2005. Economic benefits of combining soil and water conservation measures with nutrient management in semiarid Burkina Faso. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 70, 261–269.
- Zougmore, R., Zida, Z., 2000a. Lutte Anti-Erosive et Amélioration de La Productivité Du Sol Par l'aménagement de Cordons Pierreux. Fiche Technique 1. INERA, Koudougou, Burkina Faso.
- Zougmore, R., Zida, Z., 2000b. Récupération Agronomique Des Terres Encroustées Par La Technique de Demi-Lune. Fiche Technique 8. INERA, Koudougou, Burkina Faso.
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, F., 2000. Récupération Agronomique Des Terres Encroustées Par La Technique de Zaï. Fiche Technique 6. INERA, Koudougou, Burkina Faso.



Relationship between soil water content and crop yield under sahelian climate conditions: case study of Tougou experimental site in Burkina Faso.

Cheick Oumar Zouré¹, Mahamadou Koïta^{1*}, Dial Niang¹, Izza Issa Baba¹, Ousmane Roland Yonaba¹, Amagana Emmanuel Dara¹, Tazen Fowé¹, Pierre Queloz² and Harouna Karambiri¹

¹ Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso, Rue de la science, BP 594 Ouagadougou 01
mahamadou.koita@2ie-edu.org

² Environmental Engineering & Geomatics Department, Institut of Geomatics, Environment Management, Construction and Monitoring of Civil Engineering Structures (G2C), School of Engineering and Management Vaud of Yverdon-les-Bains, Swiss

ABSTRACT

This study aims at assessing the relationship between soil water stock and the yield of agricultural practices in Tougou catchment located in northern Burkina Faso. It is a region that has experienced a significant and continuous degradation of its natural resources, especially soils, due to the climate variability and the rapid increase of the population. Areas allocated to subsistence agriculture are increasing at the expense of pastoral land. This degradation causes a change in processes and mechanisms that control ecological systems. In order to provide solutions to this issue, some agricultural practices have been implemented to improve crop yield. This is particularly the case of traditional techniques: "zai", "stony line" and "half-moon", which can significantly improve the soil infiltration capacity and yield. Daily monitoring of soil moisture and pressure in experimental plots based on these agricultural practices show that half-moon and Zai provided good yield with 2180kg / ha and 1070 kg / ha respectively compared to that of the control plot with about 480 kg/ha. These important yields are due in large part to the improvement of the retention capacity of these soils, thus giving to crops the necessary water need for their development even in drought periods

Indexing terms/Keywords

water content, yield, agricultural practices, crop, sahelian climate, Tougou, Burkina Faso

1. INTRODUCTION

For several decades, the increasing of population pressure in arid zones located in the north and south of the Sahara has led to profound changes in the management and use of natural resources and agricultural land [1,2,3]. These anthropogenic disturbances result in scarcity of natural vegetation, soil degradation (water and wind erosion), deterioration of the soil water regime, and a decrease in water efficiency for crop production. This has negatively affected agricultural activities in several Sahelian countries. Agricultural yields decline very significantly in this region as a result of climatic hazards and anthropogenic actions [4]. Indeed, according to the fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [5], rainfed crop yields could fall by 50% by 2020 in most of these countries. This is unfortunately the case for Burkina Faso where the situation is very pronounced in its Sahelian part. Indeed, according to the assessment provided in 1994 by the Institute for Environment and Agricultural Research of Burkina Faso (INERA) [6], about 90% of arable land in Burkina Faso Sahel is severely degraded, leading to a reduction in useful agricultural land per capita and marginal land use. In addition, the decline in annual rainfall in this region (more than 20%) since the end of the 1960s [7] has resulted in yield reduction of cereal production of about 16-20% [8]. In this region, the degradation of soil productivity results from the unbalance of organic and mineral matter induced by repeated fires, overgrazing, clearing and cultivation. This unbalance is further accelerated by erosion, with the main consequences being a reduction of litter restitution to the soil, resulting in a decrease in the soil organic matter content and biological activities. This increases the risk of runoff, erosion and nutrient leaching, which in turn accelerates unbalance and degradation. Reducing soil's ability to store water and nutrients causes a decline in cultivation efficiency, which has become essential to maintain a porosity that is suitable for crops rooting and weeds control.

In response to these limiting factors, Sahelian farmers of Burkina Faso supported by development partners and State departments have initiated water and soil conservation techniques such as zai, stony line and half-moons [9,10] to reverse the trend. These techniques have largely restored the physical, organic and chemical properties of these degraded soils, thus improving crop yields by a factor of 8 to 16 [11], restoring the efficiency of degraded soils [12] and mainly increasing household incomes [13,14]. More than 70% of farmers have adopted these agricultural techniques [15, 16, 10]. It is in this context that the present study is initiated in the Tougou experimental site and aims at establishing a relationship between the soil water content available for the root zone and yields.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study Site

The study area is the Tougou catchment (between Latitudes of 13 ° 40 ' and N, and longitudes of 2°13' and E), a surface sub-catchment of Nakambé river in the north-east of Burkina Faso. It has a surface area of 37 km² (Figure 1). The climate is semi-arid with a mean annual rainfall of between 400 and 650 mm. Temperatures range between 18 and 40°C. The dry

season extends from October to May and the rainy season from June to September with peak precipitation generally recorded in July or August. Soils are cultivated or denuded (degraded) and the vegetation consists of savanna, shrub and grassy steppe.

The site is dominated by tropical ferruginous soils leached with stains and concretions. The soil profile is composed of three main horizons. From top to bottom, we have:

- a sandy loam horizon from the top soil to 22 cm deep;
- a loam-clay horizon which thickness can reach 60 cm;
- a clay horizon which thickness can reach 40 cm.

The structure is subangular polyhedron weakly developed up to 83 cm deep and massive beyond.

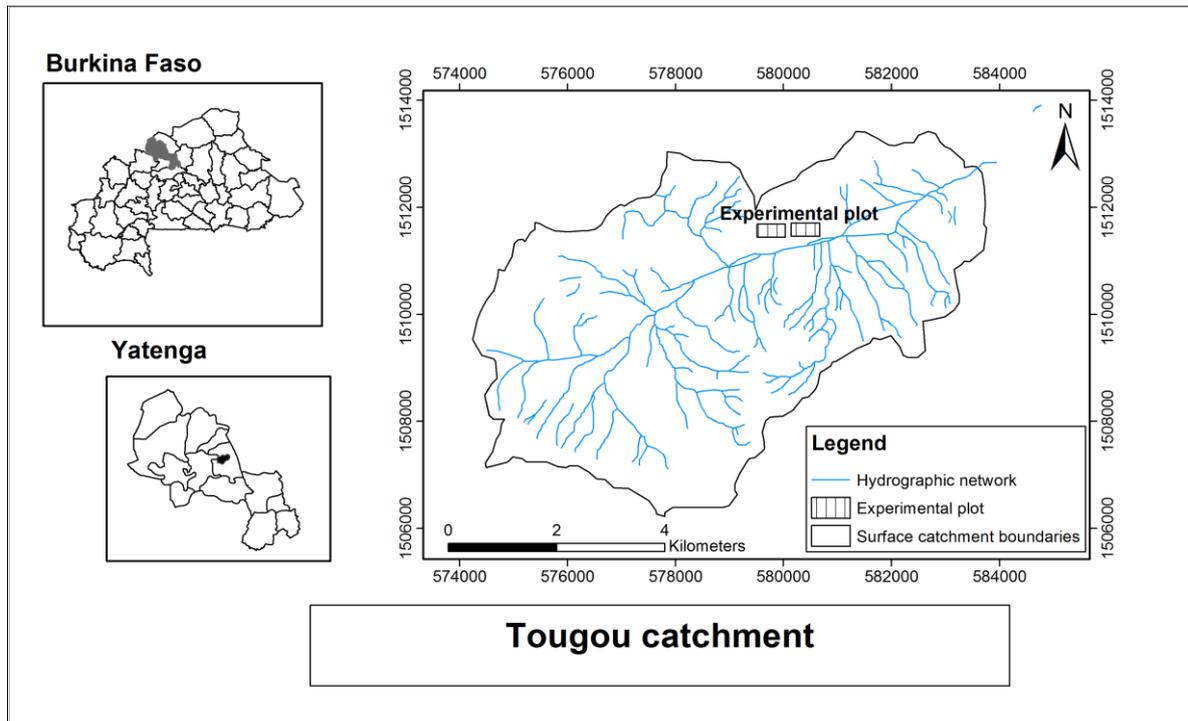


Fig 1: Location of Tougou surface catchment.

The experimental design (Figure 2) consists of two separate Fisher blocks A and B, the distribution of which is random. Each block consists of four plots of 200 m² (20 m long by 10 m wide) each receiving a specific treatment (agriculture practice): direct seeding as a control plot (T0), a stony line plot (T1), a half-moon plot (T2) and a zai plot (T3):

- Control plot (T0) is without any cultivation practice where direct seeding in rows was carried out;
- Stony lines (T1) aim at reducing the runoff on the fields using a semi-permeable alignment consisting of 2 to 3 lines of polymorphic stones. These stones are arranged along topographic contour lines with a ground anchoring of 10 to 15 cm. The average height of the alignment varies between 20 and 30 cm for a crest width ranging from 15 to 25 cm. The lines are arranged perpendicular to the direction of flow;
- Half-moon is a technique consisting of semicircular holes designed for the remediation of bare land. They are arranged perpendicular to the flow and have a diameter of 4 m. Their depth varies from 10 to 20 cm and the excavation is arranged in the form of a crescent at their downstream. Suitable for areas of low rainfall, they should not be implemented on hydromorphic and sandy soils
- Zai means in Mooré (local language) "to get up early and hurry to prepare one's land" or "break up and crumble the soil crust before seeding" [14,17]. This is a traditional technique implemented in Yatenga (northern Burkina Faso) from 1982 to 1984, following years of drought. It is a technique for encrusted soils remediation by digging holes 20 to 40 cm in diameter and 10 to 15 cm deep in order to collect the runoff and to infiltrate it. The cuttings are crescent-shaped downstream to capture runoff. The spacing between the zai hole is 60 cm x 60 cm.

An organic amendment (cow dung) of 5t/ha is applied to each plot prior to seeding and a microdose application of NPK fertilizer (2-4 g per hole) after crop emergence and urea (1 g per hole) at the run [12,18]. Plots are grown with a 70-day cycle millet variety (IKMP5 Kiipalla). The choice of this variety is justified by its precocity, its resistance to drought and its wide adoption by local farmers.

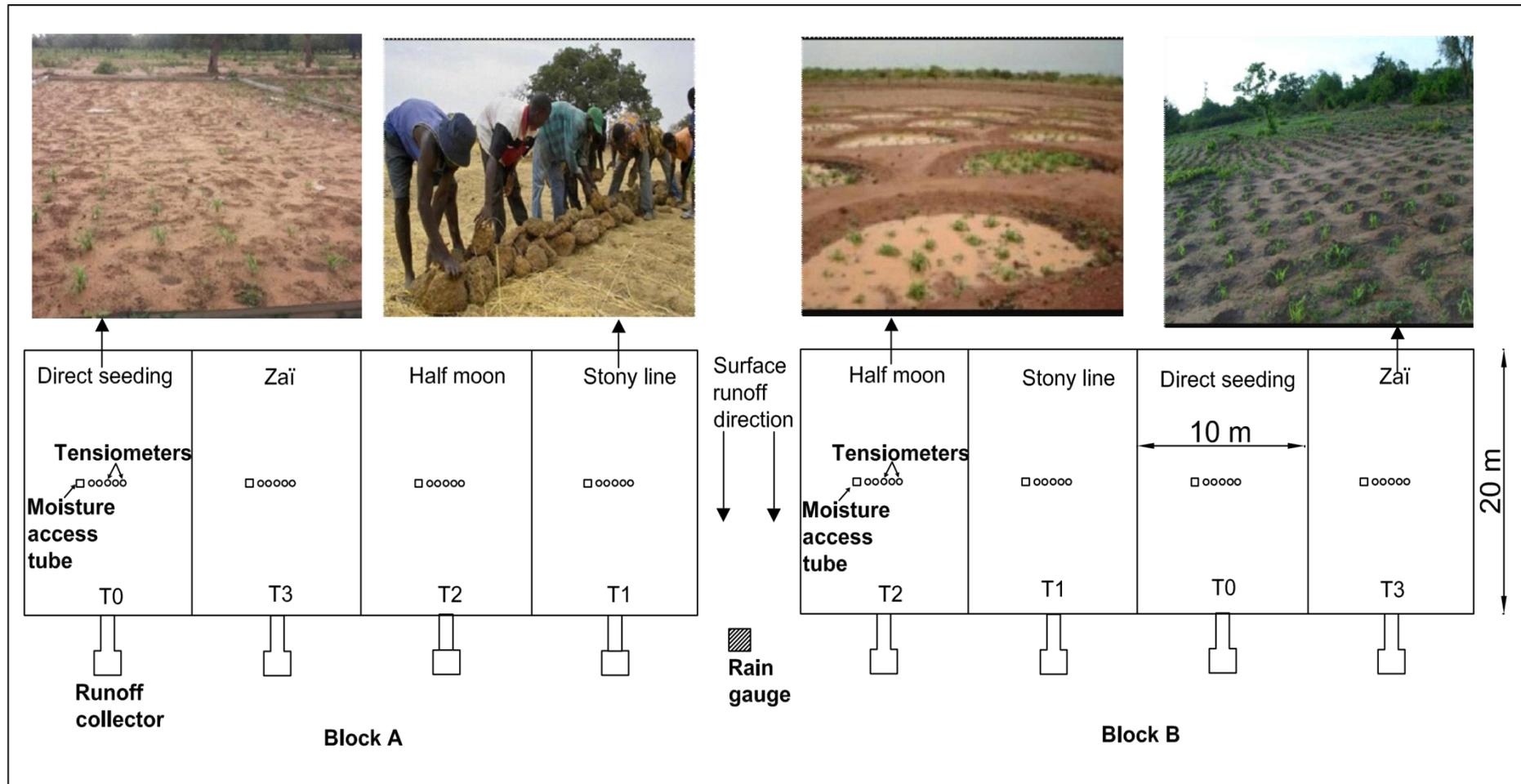


Fig 2: Plots design in Tougou experimental site

2.2. Field-Data Collection

Temporal monitoring of soil moisture and soil pressure is conducted daily at 6 a.m. during field campaigns from June to October. Moisture measurements are conducted at the center of each plot; each 10 cm deep to 100 cm using a neutron probe. Pressure measurements are conducted at the same locations using tensiometers at different depths (20, 40, 60, 80 and 100 cm). These measurement depths correspond to root zone. Additional measurements of these two parameters are made at the end of each rainy event. Yields are determined on each plot using the yield square method.

2.3. Data Processing

The water content (S) available between the soil surface and 100 cm depth (area occupied by millet roots) is calculated from integration of the volumetric water content (equation 1):

$$S_{z_2-z_1} = \int_{z_1}^{z_2} \theta dz \quad (\text{equation 1})$$

Where θ (cm³/cm³) is volumetric moisture, Z (m) is depth.

In the present study, the water content is estimated by considering that water content measurements at depths z_i (each 10 cm) are representative of 10 cm thick layer located on both sides of the considered depth. The water content S (mm) at depth z is obtained from Equation 2:

$$S_{0-z} = (\theta_{10} \times 100) + (\theta_{20} \times 100) + (\theta_{30} \times 100) + \dots + (\theta_{100} \times 100) \quad (\text{equation 2})$$

Change in water content ΔS in soil layer extension z_1 - z_2 between two measurement dates t_1 and t_2 is obtained from Equation 3:

$$\Delta S = S_{z_1-z_2}(t_2) - S_{z_1-z_2}(t_1) \quad (\text{equation 3})$$

Yields are obtained from the yield squares method which consists in placing a square randomly in the plot to determine an average yield after harvest (equation 4).

$$R(\text{kg/ha}) = \frac{P(g)}{S(\text{m}^2)} \times 10 \quad (\text{equation 4}),$$

Where R (kg/ha) is yield; P(g) is crop weight harvested in yield square and S (m²) is the square area.

In our case, three yield squares of 1m side are installed on each plot and the yield is obtained as follows (equation 5):

$$R_{\text{moy}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 X_i \quad (\text{equation 5}),$$

Where R_{mean} (kg/ha) is mean yield and X_i (kg/ha) is yield determined in a yield square.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Results

- Soil water content

Figure 1 shows in the different plots the temporal distribution in 2016 of the integrated water content between the surface and the depth of 100 cm (corresponding to root zone). In all plots, the water content remains relatively low compared to the rainfall. Indeed, the water content varies between 120 and 220 mm compared to the total rainfall of 424.6 mm with however greater differences between the plots. In the plot T0A the variation of the water content is too low and reaches a maximum value of 120 mm and water that has infiltrated in this plot is located in the first 50 centimeters hence it is rapidly taken off by evaporation during the days following rainy events. However, the zai and half-moon plots have higher water content (up to 220 mm) that can accumulate longer in the soil.

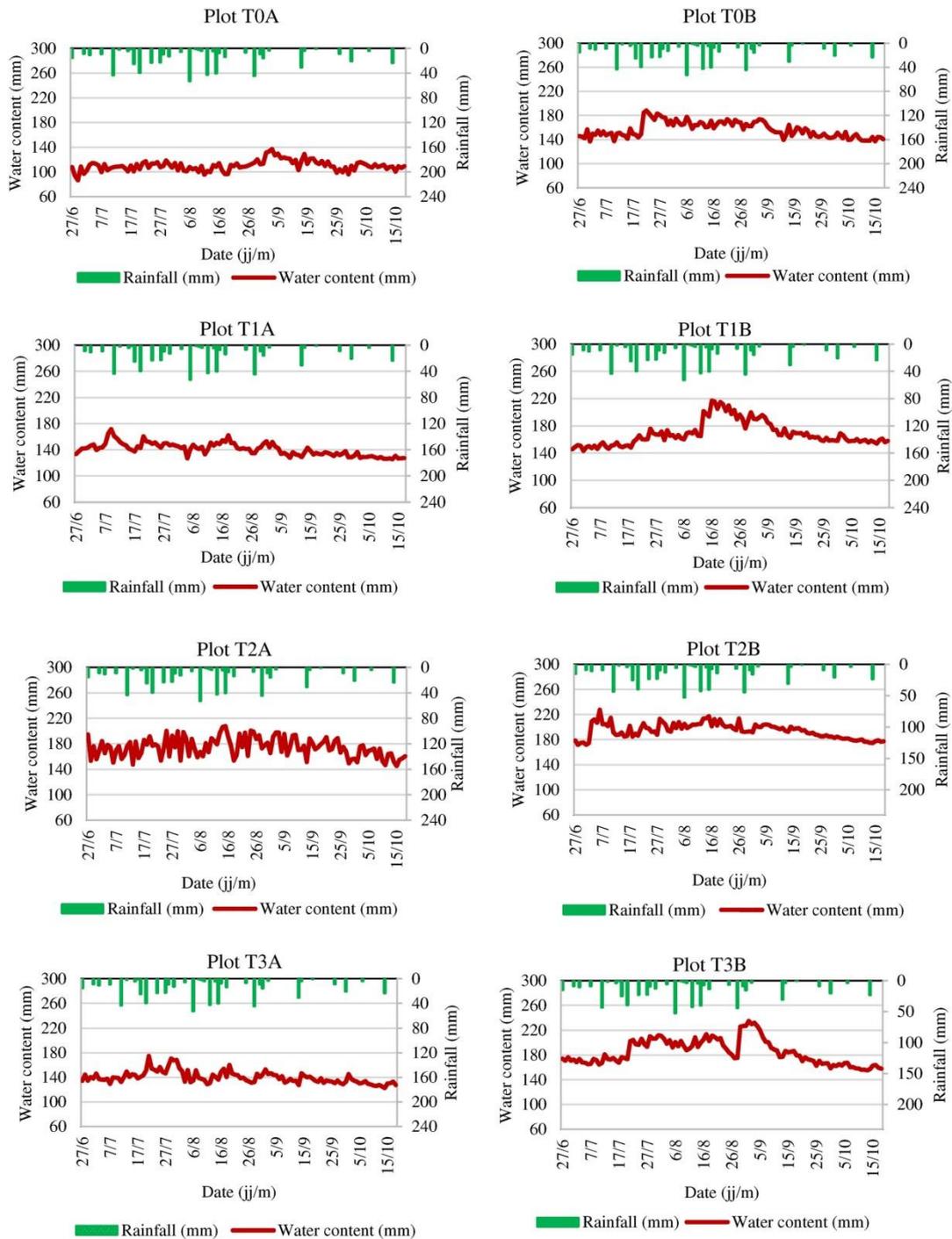


Fig 3: Temporal distribution in 2016 of the integrated water content (mm) between soil surface and the depth of 100 cm in each experimental plot.

This difference in water content between the plots makes it possible to demonstrate the efficiency of the half-moon and the Zai techniques in the water storage process. These two agricultural practices by destroying soil roughness tend to increase the retention capacity with more favorable surface infiltration conditions, while for the control and stony-line plots, the surface conditions strongly influence the amount of water that will infiltrate hence the lower water content observed on these agricultural practices.

- **Yields**

Yield is one of the parameters that can express the performance of an agricultural production technique. The yield values of millet determined in experimental plots during the agricultural campaigns conducted in 2015 and 2016 are shown in

Figure 2. This figure shows differences between plots. Indeed, the lowest values are found in control plots and the highest in the Zaï and half-moon plots.

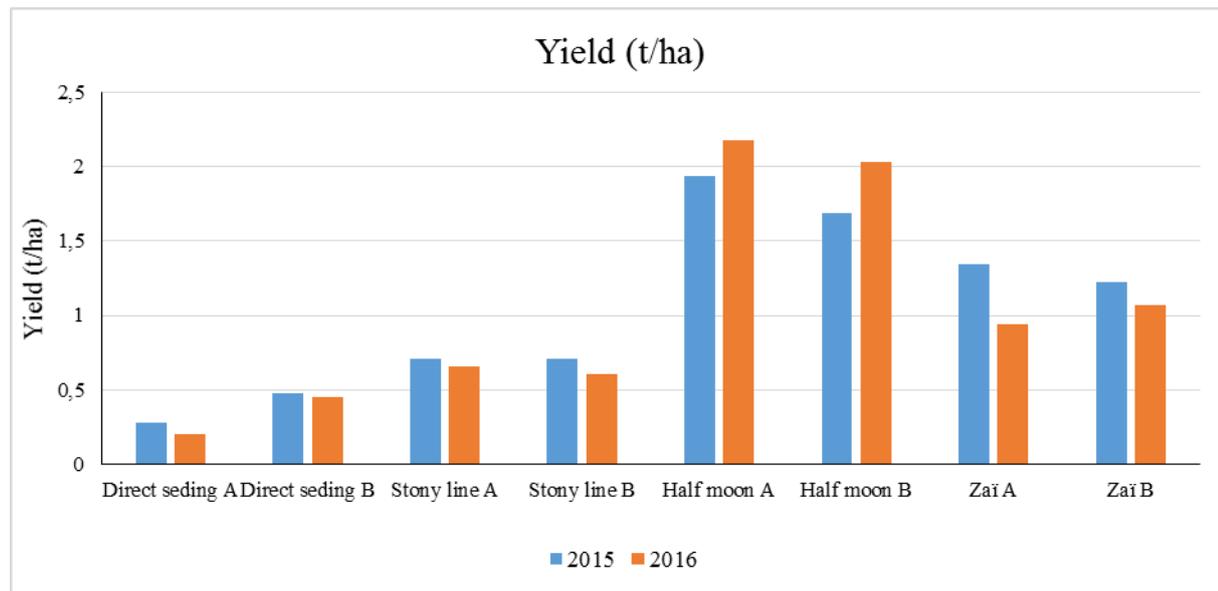


Figure 4: Yields values of millet determined in experimental plots in 2015 and 2016.

The water content and yields values determined in experimental plots during field campaign in 2016 show a positive correlation between these two parameters because the highest yields are determined in plots showing the highest water content. Indeed, the zai and half-moon plots with high water content values (220 and 240 mm respectively) record yields values of 1070 and 2180kg per hectare respectively and the lowest yields are determined in the control and stony line plots where we note the lowest water content.

3.2. Discussion

Our results showed that agricultural practices such as the Zaï and the half-moon provided significant yields with 1070 kg/ha and 2180kg/ha respectively. These values are higher than one of the control plot where the yield is 480 kg/ha. Harvests are much higher than the regional mean even in the year of rainfall deficit (in 2016 annual rainfall was 424 mm compared to an interannual mean of 600 mm). This behavior of these two practices can be linked to the improvement of the soil retention capacity, thus giving to crops the necessary water need for their development even in case of severe drought pockets (more than 7 days without rain events). The digging of open holes has led to a better water infiltration into the soil and to a better water supply to exploit glacies mineral reserves. This result demonstrates the interest in the Zaï technique as a soil and water conservation practices effective in the runoff management [17]. The improvement of water availability by surface crust destruction will promote more infiltration to the soil surface resulting in more water stock available in the root zone. This high availability of water for cultivation does not mean it is the only parameter responsible for the significant increase in yields. Indeed, the removal of the physical constraint improves water conditions, but reveals other major constraints that would be linked to the soil chemical and biological poverty. Optimizing rainwater use is only of limited benefit if soil nutrient deficiency is not corrected [19]. This significant increase in yields is related to the fundamental action of organic matter summarized by Pieri [20] in three essential roles: i) it stimulates the development of crop roots; ii) it is a major agent for the soil structure stability; (iii) it has a direct influence on crop nutrition and soil physicochemical properties due to its mineralization and its significance in nitrogen dynamics. According to Sedogo [21] the impact of organic matter on sorghum performance would be linked to the improvement of physico-chemical and biological properties of the soil. Zangré [22] showed that there is a strong correlation between the amount of soil organic matter, imbibition time, soil carbon content, microbial biomass, and yield. Hence the interest in a substantial contribution of organic matter if one wants to maintain a physicochemical and biological balance of the soil which favors a rapid development of cultures. These results corroborate several works carried out in the Sahel, including those of Roose et al. [23] who, following their study on rehabilitation of degraded lands in the Sudano-Sahelian region of Burkina Faso have revealed since first year that Zai on glacies allows producing 500 à 1000 kg/ha of millet. Somé et al. [24] showed that the disappearance of glacial crusts promotes soil aeration and water retention in Zaï holes by increasing soil moisture. Concerning control and stony-line plots, the absence of organic matter landfill in the pockets has no effect on millet production on degraded soils. Indeed, surface manure spreading does not decompose in time to make mineral elements available for crops. This result could also be explained by a nitrogen deficiency situation due to competition for this element caused by microorganisms that use nitrogen for their proliferation. Zougmore et al. [25] study showed that in decomposing this organic matter, microorganisms use mineral elements such as nitrogen, which can lead to momentary immobilization or to a lack of nitrogen in the soil limiting crops development and production. Low yields for control and stony-line plots could also be explained by low soil biological activity to decompose the manure into nutrients directly usable by crops. This observation



coupled with a low infiltration capacity (control plot), reveals approximatively the correlation between vegetative growth and millet yield [22] and indicates that low millet yields are due to a poor growth of crops during water stress periods.

4. CONCLUSIONS

The observations made in Tougou experimental plots show that the different agricultural practices are characterized by different behaviors according to the soil water content in the root zone but also to the yields. The main results show that the zaï and the half-moon present the highest water content in the root zone. This is certainly due first to the favorable conditions of infiltration created by the implementation of these two types of agricultural practices. Indeed, with these two practices, the roughness of the soil surface is destroyed thus causing more infiltration and hence a greater water availability especially during water stress periods. This high water availability also favored higher yields (1070 kg/ha for zaï and 2180 kg/ha for half-moon). The increase in these yields can also come from a substantial organic matter supply directly to the crops, because with these two practices, organic matter decomposition in the soil is very easy. The results also show that low yields are obtained in control and stony-line plots due to low infiltration capacity but also to low biological activity in the soil; which allows the organic matter to decompose into nutrients directly usable by cultures.

REFERENCES

1. Maïga-Yaleu, S., Guiguemde, I., Yacouba, H., Karambiri, H., Ribolzi, O., Bary, A., Ouedraogo, R., Chaplot, V. 2013. Soil crusting impact on soil organic carbon losses by water erosion. *Catena*, 107, pp. 26–34.
2. N'Guessan, K.A., Diarrassouba, N., Alui, K.A., Nangha, K.Y., Fofana, I.J., Yao-Kouame, A. 2015. Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire : cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 11(3), pp. 115–128.
3. Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), pp. 242–254.
4. IPCC, 2001b. *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats Unis d'Amérique, 1031p.
5. IPCC.2007. « Contribution du Groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'expert sur l'évolution du climat », Rapport d'évaluation, Bangkok (Thaïlande).
6. INERA 1994.. *Les systèmes de production dans la zone Ouest du Burkina Faso : potentialités, contraintes, bilan et perspectives de recherche*, Ouagadougou (Burkina Faso). 48p.
7. Sissoko, K., van Keulen, H., Verhagen, J., Tekken, V., Battaglini, A. 2011. Agriculture, livelihoods and climate change in the West African Sahel. *Regional Environmental Change*, 11 (1), pp. 119-125.
8. INSD. 2009. *Annuaire statistique (2008)*, INSD: Ouagadougou (Burkina Faso), pp. 155-191
9. 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(5), pp. 790–803.
10. Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T. 2015. Farmers' Perception and Willingness to Pay for Climate Information in Burkina Faso. *Journal of Agricultural science*. 8(1), p. 175
11. Amede, T., Tarawali, S., Peden, D. Zai improves nutrient and water productivity in the Ethiopian highlands. (Special Issue: Improving water productivity of crop-livestock systems in drought-prone regions.). *Experimental Agriculture* 2011, 47(S1), pp. 7–20.
12. Sawadogo, H., Bock, L., Lacroix, D., Zombre, N.P. 2008. Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 12(3), pp. 279–290.
13. Zongo, B. 2016. *Stratégies innovantes d'adaptation à la variabilité et au changement climatiques au Sahel : Cas de l'irrigation de complément et de l'information climatique dans les exploitations agricoles du Burkina Faso*. Thèse de doctorat, Université de Liège et l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Liège (Belgique).
14. Zougmore, R., Ouattara, K., Mando, A., & Ouattara, B. 2004b. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), pp. 41-48.
15. Drechsel, P., Olaleye, A., Adeoti, A., Thiombiano, L., Barry, B., Vohland, K. 2005. Adoption driver and constraints of resource conservation technologies in sub-Saharan Africa. Berlin: FAO, IWMI, Humboldt Universitaet, pp 1-21
16. Kpadonou, R.A.B., Owiyo, T., Barbier, B., Denton, F., Rutabingwa, F., Kiema, A. 2017. Advancing climate-smart-agriculture in developing drylands: Joint analysis of the adoption of multiple on-farm soil and water conservation technologies in West African Sahel. *Land Use Policy*, 61, pp. 196–207.



17. Kaboré, V. 1995. Amélioration de la production végétale des sols dégradés (zippella) du Burkina Faso par la technique des poquets (Zaï). Thèse sciences n°1302(1994), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (Suisse).
18. Zougmore, R., Mando, A., Stroosnijder, 2004a. L. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil-plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agricultural Water Management* 65(2), pp. 103–120.
19. Roose, E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique FAO*, n°70, 420 p.
20. Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et du Développement (CIRAD) Montpellier, France. 444 p. ISBN : 2-87614-024-1
21. Sedogo, P.M. 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire).
22. Zangré, B.V.C.A. 2000. Effets combinés du travail du sol et des amendements organiques sur la fertilité d'un sol ferrugineux tropical lessivé dans la région de Saria (zone centre du Burkina Faso), Mémoire, IDR.
23. Roose, E., Kabore, V., Guenat, C. 1995. Le zaï: fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahier ORSTOM Pédologie*. 28(2), pp. 159-173
24. Somé, L., Hien, V., Bilgo, A., Sangaré, S., Karambiri, L., Kaboré, P., Lepage, M., Traoré, J., Somé, B., and Traoré, K. 2004. Rapport du projet de lutte contre la désertification au Sahel et étude de leur impact agro-écologique, INERA, Kamboinse (Burkina Faso), 91p.
25. Zougmore, R., Zida, Z. and Kambou, F.N. 1999. Réhabilitation des sols dégradés: Rôles des amendements dans le succès des techniques de Demi-lune et de Zaï au Sahel. *Bulletin du Réseau Erosion*, 19, pp. 436-450.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).