



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

THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

Spécialité: **Eau**

Présentée et soutenue publiquement

Par

Vivien Chaim DOTO

Le 04 février 2016

Réf: 2iE/2016-03

**L'IRRIGATION DE COMPLEMENT A PARTIR DE PETITS BASSINS INDIVIDUELS
EN ZONE SAHELIENNE BURKINABE : *IMPACT SUR LA PRODUCTION DES
EXPLOITATIONS AGRICOLES FAMILIALES***

JURY

M. Hama YACOUBA, <i>Professeur Titulaire</i> , 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse
M. Luc Olivier SINTONDJI, <i>Maître de Conférences</i> , Université d'Abomey- Calavi, Bénin	Rapporteur
M. Mahaman Moustapha ADAMOU, <i>Maître de Conférences</i> , Université Abdou Moumouni, Niger	Rapporteur
M. Kossi Euloge AGBOSSOU, <i>Professeur Titulaire</i> , Université d'Abomey- Calavi, Bénin	Examineur
M. Karimou J.M. AMBOUTA, <i>Professeur Titulaire</i> , Université Abdou Moumouni, Niger	Président

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

DEDICACES

À TODJI Rufine

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à formuler mes sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à sa réussite.

Mes sentiments respectueux s'adressent d'abord à l'égard du Professeur Hamma YACOUBA, Directeur de la Recherche à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), qui a accepté porter la direction de cette thèse. Je le remercie pour sa confiance, son appui et son judicieux concours aux différentes étapes de ce travail qui ont contribué grandement à cet heureux aboutissement. Sa rigueur au travail et ses différents conseils m'ont été d'un grand secours pour mener à bien les travaux.

Je remercie le Professeur Karimou Jean-Marie AMBOUTA de la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir accepté présider mon jury de thèse. Qu'il me soit permis de remercier le Professeur Luc Olivier SINTONDJI, hydrologue à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin et le Professeur Mahaman Moustapha ADAMOU spécialiste en génie de l'eau et de l'environnement à la Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Vos diverses remarques et suggestions ont contribué grandement à l'amélioration des résultats de mes travaux. Mes remerciements vont ensuite à l'endroit du Professeur Euloge K. AGBOSSOU, Directeur de l'Institut National de l'Eau (Bénin) pour ses précieux conseils et sa disponibilité pour l'examen de ce rapport et sa contribution pour son amélioration. Sincères remerciements à Docteur Dial NIANG, Enseignant – Chercheur au Département Hydraulique à 2iE et à Docteu. Rabah LAHMAR, Chercheur en agro pédologie au CIRAD/2iE pour leur contribution à l'amélioration scientifique de ce travail. En tant que membres du comité de thèse, j'ai pu profiter de leurs multiples expériences en hydrologie, en physique du sol et en agro pédologie pour mener à bien mes recherches.

Qu'il me soit aussi permis de remercier la direction de 2iE qui, grâce au concours financier du Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI), n'a pas ménagé son soutien pour que ce travail soit mené à terme.

A mes parents qui m'ont supporté durant toute ma formation, à mon équipe de terrain et tous les stagiaires ; qu'ils reçoivent ici toute ma gratitude. J'exprime aussi mes remerciements à toute l'équipe de l'ONG AZND de Kongoussi en tant que mon facilitateur sur le terrain auprès des producteurs. Je veux dire également ma reconnaissance à tous les producteurs de Mogodin.

Je remercie, pour finir, Professeur Harouna KARAMBIRI, Directeur de l'Ecole Doctorale pour son ingéniosité, l'ensemble des Doctorants de 2iE pour leur franche collaboration et tous mes parents, mes frères et sœurs pour leur soutien et encouragement.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIERES	iv
RESUME	ix
ABSTRACT	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : POINT DES CONNAISSANCES SUR L'AGRICULTURE FAMILIALE EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE	10
1.1. Petits agriculteurs, souveraineté alimentaire et défi climatique en Afrique saharienne	10
1.1.1. Situation alimentaire.....	10
1.1.2. Le défi climatique	11
1.1.3. Le changement climatique et le secteur primaire.....	11
1.2. Quelques stratégies d'adaptation dans le secteur agricole	13
1.2.1. Informations climatiques de précampagne	13
1.2.2. Utilisation des indices de sécheresse.....	14
1.2.3. Agriculture intelligente.....	15
1.3. Variabilité climatique et irrigation de complément.....	16
1.3.1. Concept de sécheresse en agriculture pluviale	16
1.3.2. Irrigation de complément et rendement des cultures pluviales	18
1.3.3. Irrigation et souveraineté alimentaire.....	19
1.4. Collecte des eaux de surface (CES) en Afrique sub-saharienne	21
1.4.1. Concept de CES et typologie des techniques y afférentes	21
1.4.2. Adoption et reproductibilité des techniques de collecte des eaux de surface...24	
1.5. Place de la présente recherche face au défi climatique en Afrique Subsaharienne	24

Conclusion partielle	25
CHAPITRE 2 : PROCESSUS PHYSIQUE ET NUMERIQUE DE TRANSFERT D'EAU DANS LE SOL	26
2.1. Transferts d'eau dans un sol variablement saturé	26
2.1.1. Variables de base et équation générale de l'écoulement de l'eau	26
2.1.2. Importance des courbes caractéristiques du sol.....	28
2.1.3. Direction d'écoulement de l'eau dans le sol.....	28
2.1.4. Bilan hydrique	30
2.2. Modélisation numérique des transferts d'eau	30
2.2.1. Caractéristiques générales du modèle HYDRUS-2D/3D	31
2.2.2. Etapes de la simulation numérique sous HYDRUS	31
2.2.3. <i>Avantages et limites de la modélisation numérique sous HYDRUS</i>	37
2.3. Détermination de la courbe de conductivité hydraulique.....	38
2.3.1. Description de l'infiltromètre à disque et fonctionnement.....	39
2.3.2. Quelques modèles de détermination du flux d'infiltration axisymétrique	40
Conclusion partielle	45
CHAPITRE 3 : RESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE.....	46
3.1. Localisation du milieu d'étude et démographie	46
3.2. La végétation.....	46
3.3. Contexte climatique et réseau hydrographique.....	47
3.4. Caractéristiques agro-pédologiques	51
3.5. Caractéristiques agro-économiques	55
Conclusion partielle	56
CHAPITRE 4 : MATERIEL ET METHODES	57
4.1. Description du BCER d'étude.....	57
4.2. Description du matériel végétal utilisé	58
4.3. Détermination des dates de début et de fin de saison agricole.....	59
4.3.1. Enoncé des critères de Sivakumar et adaptation à la zone d'étude.....	59
4.3.2. Procédure	59

4.4.	Etude statistique des séquences sèches.....	60
4.4.1.	Le modèle statistique d'analyse des séquences sèches.....	61
4.4.2.	Application des chaînes de Markov aux pluies décadaires.....	62
4.4.3.	Analyse de l'impact potentiel des séquences sèches et détermination du niveau de satisfaction des besoins en eau du maïs	63
4.5.	Etude expérimentale de l'irrigation de complément	64
4.5.1.	Site d'étude et dispositif expérimental	64
4.5.2.	Conduite de l'essai et bilan d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère ..	67
4.5.3.	Etablissement du bilan d'eau sur le BCER	75
4.5.4.	Détermination des probabilités de remplissage du BCER et de l'emblavure irrigable en maïs selon la campagne agricole.....	76
4.5.5.	Efficiences de l'utilisation de l'eau	79
4.5.6.	Traitement et analyse statistique des données.....	79
4.6.	Méthode d'optimisation de l'irrigation de complément et analyse de la contribution des BCER à la réalimentation des nappes.....	80
4.6.1.	Justification du code retenu pour l'étude des transferts d'eau	81
4.6.2.	Mise en œuvre de la simulation des transferts d'eau dans le sol.....	82
4.6.3.	Evaluation et validation du modèle	87
4.6.4.	Processus d'optimisation du scénario d'irrigation de complément.....	88
4.6.5.	Analyse des flux d'eau sous les BCER à l'aide de HYDRUS 2D/3D.....	91
4.7.	Analyse socio-économique de la technologie.....	94
4.7.1.	Rentabilité économique de la pratique de l'irrigation de complément	94
4.7.2.	Evaluation de la contribution à la souveraineté alimentaire	95
	Conclusion partielle	95
	CHAPITRE 5 : CARACTERISATION DE LA CAMPAGNE AGRICOLE ET CONTRIBUTION AGRONOMIQUE ET HYDROLOGIQUE DES BCER	96
5.1.	Etude pré-expérimentale	96
5.1.1.	Dates de début, de fin et longueur de la campagne agricole	96
5.1.2.	Détermination des décades favorables au semis dans le Sahel Burkinabè	98
5.1.3.	Distribution statistique des séquences sèches dans le Bam.....	99

5.1.4.	Impact des séquences sèches sur le développement du maïs	101
5.2.	Etude expérimentale	102
5.2.1.	Construction des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER)	103
5.2.2.	Effet des traitements hydriques sur la croissance en hauteur des plantes.....	103
5.2.3.	Effet des traitements hydriques sur la dynamique racinaire.....	104
5.2.4.	Etude des transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère et bilan d'eau sur le BCER.....	105
5.2.5.	Evaluation socio-économique de la pratique de l'irrigation de complément ...	120
5.3.	Etude post-expérimentale.....	121
5.3.1.	Analyse de sensibilité du modèle.....	122
5.3.2.	Evaluation et validation du code HYDRUS 2D/3D.....	122
5.3.2.1.	<i>Comparaison des humidités simulées et observées sur la parcelle d'essai</i>	122
5.3.2.2.	<i>Efficacité du modèle à reproduire les teneurs en eau sous le BCER</i>	123
5.3.3.	Scénario d'irrigation de complément adapté au Sahel Burkinabè	124
5.3.4.	Recharge de la nappe phréatique par le BCER	125
5.3.4.1.	<i>Dynamique de la nappe phréatique</i>	125
5.3.4.2.	<i>Contribution du BCER à la recharge de la nappe phréatique</i>	126
5.3.4.3.	<i>Les flux d'eau aux frontières du domaine de simulation</i>	128
	Conclusion partielle	129
	CHAPITRE 6 : DISCUSSION	131
6.1.	Etude statistique et expérimentale.....	131
6.1.1.	Afrique subsaharienne face à la variabilité climatique	131
6.1.2.	Importance du calage de la période favorable au semis du maïs	131
6.1.3.	Contribution de la technologie de mobilisation d'eau à la parcelle à l'augmentation de la résilience des petites exploitations agricoles.....	132
6.2.	Spatialisation de la contribution agronomique et hydrologique des BCER	137
	Conclusion partielle	141
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	142
	REFERENCES.....	147
	ANNEXES	171

Annexe 1 : Comparaison des modèles de simulation des transferts d'eau dans le sol.....	172
Annexe 2 : Courbes d'étalonnage par couche de 10 cm.....	173
Annexe 3 : Test de Pettitt sur les caractéristiques de la longueur de la campagne.....	174
Annexe 4 : Infiltrométrie à 80 cm de profondeur	174
Annexe 5 : Guide de construction des bassins de collecte des eaux de ruissellement	175
Annexe 6 : Résultats des tests d'analyse de variance	178
Annexe 7 : Evolution comparée des teneurs en eau observées et simulées.....	179
Annexe 8 : Liste des productions scientifiques et résumé des articles.....	180

RESUME

Cette étude a été menée dans la province du Bam située en zone sahélienne Burkinabè pour évaluer la contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER) à l'atténuation des poches de sécheresse fréquentes et récurrentes dans cette zone. L'approche méthodologique a été basée sur la caractérisation statistique de la campagne agricole par implémentation sous le logiciel INSTAT+ du critère de Sivakumar modifié. L'efficacité des BCER a été analysée à partir de l'établissement du bilan hydrique. Quatre traitements hydriques ont été conduits sur une parcelle de maïs de 0,2 ha subdivisée en quatre blocs de Fisher comportant chacun: un traitement témoin pluvial et trois scénarii d'irrigation de complément. L'optimisation du scénario d'irrigation de complément et l'analyse de la contribution des BCER à la recharge de la nappe phréatique ont été modélisées à l'aide du logiciel HYDRUS-2D/3D. Les résultats montrent que les périodes les plus favorables au semis se situent dans la troisième décade de juin et la première moitié de juillet. Néanmoins, un risque climatique s'oppose à la culture du maïs du fait que la probabilité pour que deux décades soient sèches est de l'ordre de 10% durant la mi-saison. Cependant, la pratique de l'irrigation de complément a contribué en moyenne jusqu'à l'ordre de 21% à l'augmentation du rendement de maïs. La modélisation par HYDRUS-2D/3D montre que le scénario d'irrigation de complément optimal en maïsiculture consiste en l'application d'une lame d'eau de 50 mm le sixième jour après cinq jours secs (moins de 10 mm de pluie par jour). Cette étude a aussi montré une contribution des BCER à la réalimentation de la nappe sous-jacente de l'ordre de 0,5 mm.j⁻¹.

Mots clés : irrigation de complément, collecte des eaux de pluie, atténuation des poches de sécheresse, Sahel Burkinabè

ABSTRACT

This study was carried out in Bam province, located in Burkina Faso Sahel to assess the contribution of rainwater harvesting basins (RWHB) to mitigating the frequent and recurrent dry spells in this area. The methodological approach was based on the statistical characterization of the growing season by implementing the modified Sivakumar criterion under INSTAT+ software. The effectiveness of RWHB was analyzed from the water balance. Four water treatments were conducted on a plot of 0.2 ha of maize divided into four blocks Fisher including each: a rainfed treatment and three supplemental irrigation scenarios. The optimization of the supplemental irrigation scenario and the analysis of the contribution of the RWHB to recharging groundwater were modeled using the HYDRUS-2D/3D software. The results showed that the appropriate period for sowing are in the third dekad of June and the first half of July. Nevertheless, maize faced a climate risk since the probability that two dekads are dried is about 10% in the mid-season. However, supplemental irrigation has increased corn yield of 21% on the average. Modeling with HYDRUS-2D/3D showed that the optimal supplemental irrigation scenario in maize production consists in applying a water depth of 50 mm on the sixth day after five days dry (less than 10 mm per day). This study also showed a contribution of $0.5 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ of RWHB to recharging the water table.

Keywords: Supplemental irrigation, rainwater harvesting, dry spells mitigation, Burkina Faso Sahel

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Demi-lune (a) et schéma des micro-captages (b) en zone semi-aride	22
Figure 1-2: Structure de stockage des eaux de ruissellement.....	23
Figure 2-1: Profil de charge totale - écoulement descendant.....	29
Figure 2-2 : Profil de charge totale - écoulement ascendant.....	29
Figure 2-3: Profil de charge totale - Redistribution.....	29
Figure 2-4 : Forme théorique de la fonction de réponse au stress hydrique.....	36
Figure 2-5 : Infiltromètre à disque.....	39
Figure 2-6 : Détermination des paramètres K_s et α	43
Figure 2-7: Principe d'estimation de la sorptivité.....	44
Figure 3-1 : Situation de la province du Bam et du département de Kongoussi	47
Figure 3-2: Evolution de la pluie par campagne agricole de 1960 à 2013 dans le Bam	48
Figure 3-3 : Evolution de l'indice normalisé de précipitations.....	49
Figure 3-4: Probabilité d'occurrence d'une pluie annuelle donnée de 1960 à 2013	49
Figure 3-5: Proportion d'années pour laquelle la pluie décadaire est inférieure à la moyenne décadaire sur 52 ans.....	50
Figure 3-6 : Carte hydrographique de la province du Bam.....	51
Figure 3-7 : Distribution statistique de la réserve en eau des classes de sols du Bam	54
Figure 3-8: Réserve en eau utile moyenne des horizons selon le type de sol.....	55
Figure 3-9: Evolution décennale des rendements des céréales sèches au Burkina Faso	56
Figure 3-10 : Techniques de conservation des eaux et des sols.....	56
Figure 4-1 : Dimension du bassin de collecte des eaux de ruissellement étudié.....	57
Figure 4-2: Situation du milieu d'étude (Kongoussi) et du site expérimental (Mogodin)	64
Figure 4-3: Dispositif expérimental montrant les parcelles et les sites de mesure.....	66
Figure 4-4 : Système d'irrigation et vue partielle des parcelles	67
Figure 4-5 : Plante de maïs étiquetée (a) et rhizotron en place (b) pour le suivi respectif de la croissance en hauteur et de la dynamique racinaire.....	68
Figure 4-6 : Dispositif tensio-neutronique	69
Figure 4-7: Mesure du comptage neutronique (a) et de la pression de charge (b)	70
Figure 4-8: Courbes d'étalonnage de la sonde à neutron	71
Figure 4-9 : Coupe verticale du sol et les termes du bilan hydrique	72
Figure 4-10 : Mini station météorologique et pluviomètre automatique	73
Figure 4-11 : Limnimètre sur le BCER (a) et bac d'évaporation classe A (b)	75
Figure 4-12 : BCER à parois et fond imperméabilisés avec une bâche	77
Figure 4-13 : Conceptualisation standard du système de gestion des BCER	78
Figure 4-14: Domaine de simulation et compartimentage.....	83

Figure 4-15: Représentation du domaine de simulation et les conditions limites.....	85
Figure 4-16: Variation temporelle de l'infiltration dans le bassin en 2013 et 2014	92
Figure 4-17: Domaine de simulation, conditions initiales et limites.....	93
Figure 5-1 : Caractéristiques de la campagne agricole dans la province du Bam	97
Figure 5-2 : Probabilité d'occurrence des dates de semis selon la décade	98
Figure 5-3: Proportion d'années couvrant l'évapotranspiration maximale du maïs.....	99
Figure 5-4 : Probabilité d'occurrence des longues séquences sèches dans le Bam	100
Figure 5-5 : Probabilité de transition des chaînes de Markov de premier ordre	101
Figure 5-6 : Risque des longues séquences sèches sur le développement du <i>Barka</i>	102
Figure 5-7 : Evolution de la hauteur des plants de maïs en 2013 et 2014.....	103
Figure 5-8 : Cartographie du développement racinaire du maïs	105
Figure 5-9 : Evolution des hauteurs de pluies et des irrigations de complément.....	106
Figure 5-10 : Variation temporelle du stock d'eau à 15 cm en fonction des lames d'eau	107
Figure 5-11 : Variation temporelle du stock d'eau à 80 cm en fonction des lames d'eau	108
Figure 5-12 : Séquences sèches supérieures à trois jours et les périodes d'occurrence	109
Figure 5-13 : Evolution de la charge de pression en 2013 et 2014	110
Figure 5-14: Evolution de l'eau disponible dans le BCER en 2013 et 2014.....	113
Figure 5-15 : Evolution des pertes par infiltration et évaporation d'eau sur le BCER	114
Figure 5-16 : Levé topographique de la parcelle d'essai (PI) et de l'impluvium (BV).....	115
Figure 5-17 : Probabilités d'alimentation en eau du BCER sous trois scénarii de remplissage et pour différentes aires de captage	116
Figure 5-18 : Simulation du volume d'eau disponible dans le BCER et des besoins en eau d'irrigation de complément sur la campagne agricole 2011-2012	118
Figure 5-19 : Variation de l'indice de satisfaction du maïs <i>Barka</i> en fonction de l'emblavure et de l'aire de captage des eaux de ruissellement	120
Figure 5-20 : Evolution comparée de la contribution au besoin céréalier des ménages.....	121
Figure 5-21 : Analyse de sensibilité de différents paramètres hydrauliques.....	122
Figure 5-22 : Teneurs moyennes en eau (θ) observées et simulées en régime pluvial (T_0) et en irrigation de complément (T_3) dans la couche 30-100 cm en 2013 et 2014	123
Figure 5-23: Teneur en eau observée et simulée sous le BCER au 45 ^{ème} JAS en 2014	124
Figure 5-24: Profil hydrique (a) et reconstitution de l'eau utile du sol (b).....	125
Figure 5-25 : Fluctuation du niveau de la nappe et de la pluie en 2014	126
Figure 5-26: Profile hydrique pour trois dates en 2013	127
Figure 5-27: Teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) au 25 JAS sous le BCER en 2013	127
Figure 5-28: Profil hydrique du sol au stade initial et à la mi- saison en 2014	128
Figure 5-29: Flux d'eau aux frontières du domaine de simulation	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1: Caractéristiques physico-chimiques des sols de la province du Bam.....	53
Tableau 4-1 : Dose et période d'application d'engrais sous le <i>Barka</i>	58
Tableau 4-2 : Coefficient cultural et évapotranspiration maximale par période	63
Tableau 4-3: Propriétés physico-chimiques du sol du site expérimental	65
Tableau 4-4: Doses d'irrigation de complément appliquées par stade de développement	66
Tableau 4-5 : Caractéristiques des deux types de campagnes agricoles considérés.....	79
Tableau 4-6: Paramètres hydrauliques du sol du site expérimental avant et après calage ...	83
Tableau 4-7: Paramètre de la fonction d'extraction racinaire	86
Tableau 4-8 : Caractéristiques hydrauliques des sols dans le Bam	90
Tableau 4-9: Les paramètres de la fonction de van Genuchten-Mualem	92
Tableau 5-1 : Probabilité d'occurrence (%) d'une saison culturale de longueur donnée supérieure à une durée donnée sous différentes dates de début de la campagne agricole ..	98
Tableau 5-2 : Quantités d'eau drainée (mm) à 80 cm de profondeur en fonction des traitements hydriques à la fin des campagnes agricoles de 2013 et 2014	111
Tableau 5-3: Evapotranspiration réelle (ETR) et rendement en grain réel (Yact) du maïs sur chaque unité expérimentale en 2012 et 2013	112
Tableau 5-4 : Evaluation par décade des entrées pe (%) et pertes ps (%) d'eau dans le BCER	115
Tableau 5-5 : Bilan d'eau global et calcul de l'indice de satisfaction en eau du <i>Barka</i> pour une campagne sèche	119
Tableau 5-6: Statistiques d'évaluation du modèle (RMSE, NSE, RSR) et p-value du test t de Student (seuil de probabilité de 5%) pour l'évaluation de la significativité entre teneur en eau simulée et observée dans la couche 30-100 cm	123

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

ABN : Autorité du Bassin du Niger

ACMAD : Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement

AGRA: Alliance for a Green Revolution in Africa

AGRHYMET : Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle (en anglais Agriculture, Hydrology, Meteorology)

AMVS : Autorité de Mise en Valeur de la vallée du Sourou

ASAE: American Society of Agricultural Engineers

BCER : Bassin de Collecte des Eaux de Ruissellement

BUNASOLS : Bureau National des Sols

CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CES: Conservation des Eaux et des Sols

CILSS : Comité Permanent Inter-Etats pour la Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CNID-B : Comité National de l'irrigation et du Drainage du Burkina

CPCS : Commission de Pédologie et de Classification des sols

CSAO : Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest

CSIRO : Organisation pour la Recherche scientifique et industrielle du Commonwealth

DGPER : Direction Générale pour la Promotion de l'Economie Rurale

DOS : Disk Operating System

ETR: Evapotranspiration réelle

FAO: Food and Agriculture Organization for United Nations

FEWS NET: Farming Early Warning System Network

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

ICN2 : Second International Conference on Nutrition

ICRISAT: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles de Burkina Faso

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INSD: Institut National de la Statistique et de la Démographie

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

JAS: Jour après semis

MARHASA: Ministère de l'Agriculture, des Ressources Halieutiques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire

NCAR : National Center for Atmospheric Research

NEPAD : Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OMM : Organisation météorologique mondiale

PIB : Produit Intérieur Brut

PNIA : Programme National d'Investissement Agricole

PNSR : Programme National du Secteur Rural

PPCMC-BF : Projet de Promotion de La Culture de Maïs de Case au Burkina Faso

PRESAO : Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest

PROSDRp : Programme Sectoriel de Développement Rural productif

SIIP: Sahel Irrigation Initiative Project

SWI: Stockholm International Water Institute

U.S.EPA: United States Environmental Protection Agency

USA: United States of America

USAID: U.S. Agency for International Aid

UTCAF : Utilisation des terres, ses changements, l'agriculture et la forêt

WRI: World Resources Institute

WRSI: Water Requirement Satisfaction Index

INTRODUCTION

L'incidence des changements climatiques sur l'approvisionnement alimentaire varie considérablement selon les régions. D'une manière générale, le rendement des cultures devrait décroître dans la plupart des régions tropicales et subtropicales sous l'effet des modifications des températures et des régimes de précipitations (GIEC, 2001b). Selon le quatrième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007), le rendement des cultures pluviales pourrait diminuer de 50% à l'horizon 2020 dans la plupart des pays d'Afrique où se concentrera environ 20% de la population mondiale en 2030 (soit 1,5 milliards). Il y a donc une grande probabilité que les changements climatiques nuisent à la souveraineté alimentaire et aggravent les famines dans certains pays en développement. À court terme, la principale menace pour la souveraineté alimentaire pourrait venir non pas des changements progressifs du climat mais de l'augmentation prévue de la fréquence et de l'ampleur des événements climatiques extrêmes (FAO, 2002).

De toutes les régions du monde, l'Afrique et plus particulièrement l'Afrique Subsaharienne est sans aucun doute l'une des plus vulnérables aux effets néfastes du changement climatique (GIEC, 2001a). Ces effets se manifestent déjà par la survenue fréquente d'événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur. De même selon Kanohin *et al.* (2009), les ressources en eaux souterraines sont fortement affectées par les effets de la variabilité climatique se traduisant par une diminution des écoulements. Dans ce sens, la mobilisation et la gestion intégrée et durable des ressources en eau constituent un impératif pressant pour gérer l'impact négatif de la variabilité climatique (Kuassi *et al.*, 2013). Ainsi, l'impact des changements climatiques sur la souveraineté alimentaire constituera une préoccupation majeure pour le continent africain. Allié aux menaces qui pèsent sur l'approvisionnement en eau, le raccourcissement des périodes de croissance des cultures risque de provoquer des pertes de production considérables dans les pays subsahariens.

En effet, du point de vue de la variabilité climatique et du changement climatique, l'agriculture est l'un des secteurs les plus vulnérables en Afrique. Cette variabilité climatique et plus précisément la baisse de la pluviométrie a conduit dans les pays subsahariens à une réduction de 25-30% des rendements en agriculture pluviale (moins de 1000 kg.ha⁻¹), à un changement dans la demande en eau pour l'agriculture et l'utilisation des terres dont l'un des corollaires est l'accentuation de la pauvreté chez les agriculteurs (Barron, 2004). L'amélioration de la rétention en eau par des barrages, des cuvettes, des crêtes de rétention, etc., ainsi que l'utilisation efficace de l'eau à travers des systèmes d'irrigation, sont alors essentielles pour augmenter la production et faire face à des régimes de pluies de plus en

plus irréguliers (Reij *et al.*, 2009). En effet, de tout temps, les Africains ont adopté des stratégies de parade (Zougmore *et al.*, 1999 ; Malley *et al.*, 2004 ; Temesgen, 2007), surtout dans la zone sahéenne en situation de déficit hydrique, pour faire face aux effets de la variabilité du climat. Parmi ces stratégies, adoptées principalement au Mali, au Niger et au Burkina Faso on peut citer:

- ✚ la construction de diguettes antiérosives pour permettre la sédimentation ; avec le dépôt en amont des particules fines afin de réduire le ruissellement et améliorer la percolation de l'eau ;
- ✚ la technique du *zaï*, prévoit le semis des cultures dans de petits trous circulaires de 0,2 à 0,4 m de diamètre et de 0,1 à 0,2 m de profondeur disposés perpendiculairement à la pente et permettant de recueillir l'eau de pluie tout en augmentant l'humidité du sol (Roose *et al.*, 1995 ; Brown et Crawford, 2007) ;
- ✚ la technique de demi-lunes qui est une technique de collecte des eaux de ruissellement semblable au *zaï* mais de diamètre plus grand (2 à 3 m) et une profondeur de 0,3 à 0,4 m (Zougmore *et al.*, 1999).

En plus de ces techniques de maîtrise d'eau, des variétés à cycle court sont parallèlement utilisées pour s'accommoder à des saisons de pluies plus courtes. Dans ces zones de l'Afrique, des projets ont également édifié des aménagements hydroagricoles pour contribuer à l'atténuation des effets néfastes du changement climatique dans le domaine de la maîtrise de l'eau. Au nombre de ces aménagements, on peut citer, les barrages hydroagricoles et les seuils d'épandage. Mais la proportion des agriculteurs qui bénéficient de barrages et de périmètres irrigués est faible (moins de 2%); comparée au nombre total d'agriculteurs installés en zone sahéenne (Karambiri *et al.*, 2011).

Par ailleurs, les projections climatiques réalisées pour l'Afrique de l'Ouest montrent des fréquences plus rapprochées des événements météorologiques extrêmes, des températures plus élevées et des ressources en eau de plus en plus rares (GIEC, 2007). Autrement dit, le processus de changement climatique va engendrer deux phénomènes majeurs dans le Sahel (Karambiri *et al.*, 2011) :

- ✚ des sécheresses fréquentes et poches de sécheresse de plus en plus longues seront observées entre deux événements pluvieux ;
- ✚ une grande incertitude va planer sur la date de début et sur la durée de la campagne agricole.

Ainsi, au vu de ces projections climatiques, quelles nouvelles alternatives innovantes développées pour sécuriser la production agricole et améliorer les revenus des agriculteurs ? La réponse à cette problématique passe par la mise en œuvre des solutions préconisées par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2014) qui revient

encore sur cet aspect dans son cinquième rapport alarmant. D'après ce rapport, les stratégies préconisées dans le domaine agricole concernent :

- ✚ la mise au point de nouvelles pratiques agricoles ;
- ✚ l'amélioration des techniques de stockage d'eau et d'irrigation.

C'est dans le deuxième point que s'inscrit la présente étude.

Vulnérabilité de l'agriculture Burkinabè et stratégies endogènes de parade

Diouf *et al.* (2000) ont montré que le changement du régime pluviométrique s'est traduit dans les zones soudano-sahéliennes par un glissement des isohyètes de 150 à 200 km vers le sud. En Afrique Sahélienne, la diminution des volumes pluviométriques annuels au cours des quatre dernières décennies selon Elasha *et al.* (2006) est estimée à 25%. En Afrique de l'Ouest, une diminution de 20 à 40% de la pluie a été observée depuis la fin de la décennie 1960 (Sissoko *et al.*, 2011). Cette variabilité spatio-temporelle des précipitations dans les régions soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest a entraîné au Burkina Faso depuis quatre décennies une forte diminution des pluies autour des années 1968-1972; 1982-1984 et 1997 (Nicholson, 1983 et 2001; Abdou *et al.*, 2008). Ce déficit pluviométrique a été située entre 15 et 30% durant les années 1970 et 1980 (Servat *et al.*, 1997). La diminution du nombre d'évènement pluvieux a pour corollaire l'augmentation du nombre de poches de sécheresse même durant les mois les plus pluvieux (juillet et août) et une plus grande probabilité d'occurrence de sécheresse agronomique. Cette variabilité est non seulement à l'origine de l'apparition d'épisodes secs mais également conditionne fortuitement le développement d'évènements extrêmes climatiques comme les inondations. C'est ainsi qu'en 2007, suite aux inondations enregistrées en Afrique de l'Ouest, 17 689 ha de cultures ont péri dans les eaux au Burkina Faso occasionnant des pertes de production agricole estimées à 13 500 tonnes (Sarr et Issaka, 2009). De plus, le caractère aléatoire des pluies a conduit à des résultats mitigés sur la prévision des dates de semis, de fin et de la durée de la saison des pluies. Le raccourcissement de la saison culturale induit par un arrêt brutal des pluies constitue un des facteurs agroclimatiques limitants de l'agriculture pluviale. Des études récentes (Nicholson et Kim, 1997; Bader et Latif, 2011; Stern et Cooper, 2011; Sarr *et al.*, 2011) ont pu établir un lien entre les phénomènes planétaires et la sécheresse au Sahel. Ces études ont révélé qu'en année El Niño (courant côtier chaud), les poches de sécheresse ont des durées moyennes de 14 jours, alors qu'en année La Niña (courant côtier froid), elles sont de 10 jours (Stern et Cooper, 2011). Ce dérèglement du climat peut conditionner des baisses de plus de 60% de la production céréalière dans les zones sahélienne et soudano-sahélienne constituant ainsi une entrave au développement socioéconomique soutenu (Watson *et al.*, 1998). Au Burkina Faso, par exemple, la

campagne agricole 2007-2008 a été caractérisée par une baisse de 16% de la production céréalière (INSD, 2009).

Face à ces variabilités pluviométriques, les paysans sahéliens du Burkina Faso ont adopté plusieurs stratégies pour la mobilisation de l'eau à l'échelle parcellaire (Tiffen *et al.*, 1994; Reij *et al.*, 1996; Hatibu et Mahoo, 2000, Spaan, 2003). Ces pratiques paysannes apparues entre 1980 et 1985 et très exigeantes en temps de travail et efforts physiques, constituent néanmoins des alternatives novatrices pour le développement d'une agriculture résiliente au Sahel. La lutte contre l'aridité climatique au Burkina Faso a consisté à la promotion des pratiques culturales réduisant les sécheresses agricoles comme le *zai*, la demi-lune et les cordons pierreux et à l'utilisation des variétés à cycle court pour s'accommoder à des saisons culturales de plus en plus courtes. Ces techniques ont permis non seulement la récupération de nombreuses terres incultes (Fatondji *et al.*, 2001), mais aussi l'amélioration des rendements céréaliers (Roose *et al.*, 1995) et l'augmentation du niveau de la nappe phréatique (Woldearegay, 2002). Fatondji *et al.* (2001) ont rapporté qu'avec la technique du *zai*, 100000 à 300000 ha de terre dégradée ont été récupérées au Burkina Faso tandis que Roose *et al.* (1995) ont montré dans le même pays que les rendements du sorgho sont multipliés par environ 1,6 sous le *zai* en saison humide alors qu'en saison plus sèche ce coefficient passe à 2,5. Ces augmentations de rendement émanent de l'effet combiné de la rétention d'eau, du compostage et d'une fumure minérale d'appoint. Cependant, ces rendements restent faibles et varient autour d'une tonne à l'hectare, soit moins de 25% du rendement potentiel (Fox *et al.*, 2005). Botoni et Reij (2009) ont rapporté que sous les techniques de conservation des eaux et des sols (CES), un relèvement du niveau piézométrique de la nappe phréatique a été constaté par les producteurs sahéliens. Cependant, des études approfondies manquent dans ce domaine d'après Dia et Duponnois (2012).

Malgré leur effet non négligeable dans la réduction des impacts des poches de sécheresse, les techniques conservatoires d'eau deviennent peu efficaces en présence des poches de sécheresse longues et récurrentes. C'est ainsi que Roose (1993) a pu montrer au Burkina Faso que la technique du *zai* connaît des limites lorsque les poches de sécheresse excèdent plus de 2 à 3 semaines ou lors des grandes averses. Ces travaux lui ont également permis de préciser les limites de pluie qui rendent cette technique résiliente vis-à-vis de l'agressivité du climat. De même, la grande incertitude qui plane sur le début et la fin de la saison agricole entrave l'utilisation de variété à cycle court. Malgré toutes ces techniques, la productivité du travail agricole à 15 quintaux de céréales/actif/an n'est pas atteinte (Somé, 1989). L'insécurité alimentaire rode toujours dans les ménages ruraux puisque cette productivité du travail agricole n'a pas encore franchi la barre des 4 quintaux (Somé, 1989).

Face à toutes ces impondérables, quelle stratégie innovante développer pour sécuriser et augmenter la production agricole dans un pays où l'agriculture céréalière occupe plus de 80% de la population ?

Importance de la céréaliculture au Burkina Faso et risque climatique de la culture du maïs au Sahel Burkinabè

Le Burkina Faso est un pays de l'Afrique subsaharienne qui couvre une superficie de 274.000 km² et où environ 77,3% de la population vivent en milieu rural (INSD, 2009) et dépendent essentiellement de l'agriculture pluviale. Le secteur agricole occupe 80,4% de la population active et contribue pour 40% à la formation du PIB (MAHRH, 2011). La céréaliculture occupe une place importante (80,6%) dans les assolements et constitue également l'alimentation de base de la population (NEPAD-OCDE, 2011). En effet, sur une superficie totale cultivée de 3.431.000 ha, 88% sont allouées aux céréales (FAO, 1996). Le maïs (*Zea mays*) est la troisième céréale la plus cultivée au Burkina Faso après le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le mil (*Pennisetum glaucum*) (DGPER, 2010). En 1996, la maïsiculture représentait 6% des superficies emblavées en céréales. Mais depuis 2000, cette emblavure est en perpétuelle augmentation. Elle atteint en 2008 une superficie de 608.368 ha, soit 14,5% des emblavures céréalières (Sarr *et al.*, 2011). En 2010, les superficies emblavées en maïs ont augmenté de 323 % contre 53 % pour l'ensemble des autres céréales (DGPER, 2010). Cette augmentation de la superficie en maïs est favorisée par l'appui financier de l'Etat et de ses partenaires à travers notamment la mise à disposition des producteurs des semences améliorées de qualité. D'après les résultats du recensement général de l'agriculture (2006-2010), la culture du maïs est pratiquée par 78,6 % des ménages agricoles en saison pluvieuse. Les principales régions à forte proportion de ménages agricoles pratiquant la maïsiculture pluviale sont le sud-ouest (93,3 %), l'est (91,7 %), le centre-nord (89,2 %) et les Cascades (89,2 %). Par contre, les régions du centre et du Sahel connaissent les taux les plus faibles évalués respectivement à 42,9 % et 61 % (DGPER, 2010).

En outre, le maïs valorise mieux l'eau que le sorgho et le mil. En effet, l'efficacité de l'utilisation de l'eau par le maïs en condition d'eau non limitée varie de 0,8 à 1,6 kg m³ contre 0,6 à 1,0 kg m³ pour le sorgho et le mil (Doorenbos et Kassam, 1987). Cependant, le maïs est peu pratiqué au Sahel Burkinabè à cause de sa grande sensibilité au stress hydrique (Sarr *et al.*, 2011) comparativement au sorgho et au mil qui résistent mieux à la sécheresse et qui ne sont habituellement pas irrigués au Burkina Faso. En effet, selon Doorenbos et Kassam (1987), du Plessis (2003), les besoins en eau du maïs varient selon le climat entre 450 et 800 mm contre 450 à 650 mm pour le sorgho. Or, dans le Sahel Burkinabè, le cumul pluviométrique annuel est inférieur à 600 mm et concentré sur trois (03) mois (Ouedraogo *et al.*, 2010). Un risque climatique se pose alors pour la maïsiculture pluviale dans cette zone

caractérisée par une pluviométrie intra et interannuelle très erratique. D'où l'intérêt d'instaurer non seulement dans cette zone l'utilisation des variétés précoces mais et surtout une gestion durable des ressources en eau qui optimise le millimètre d'eau. Somé (1989) a montré dans la zone sahélienne du Burkina Faso que pour corriger les faibles valeurs d'indice de rendement obtenu en maïsiculture, une irrigation de complément est nécessaire. Ainsi, l'action préventive n'est plus la promotion des techniques culturales favorisant l'infiltration de la pluie au Sahel mais la mise en place d'une bonne régie d'irrigation de complément à l'échelle de l'exploitation agricole familiale pour faire face aux récurrentes poches de sécheresse dans cette zone.

En effet, nombreuses sont les études qui ont proposé la pratique de l'irrigation de complément pour tamponner les effets néfastes des poches de sécheresse fréquentes et longues tout en augmentant et en sécurisant durablement la production agricole. Dans plusieurs zones arides et semi-arides du monde, la collecte des eaux de pluies est adoptée pour l'amélioration de la subsistance (Agarwal et Narain, 1999; Zhu et Li, 2000) mais cette eau est peu utilisée pour l'irrigation complémentaire des cultures pluviales en zone semi-aride de l'Afrique Subsaharienne (SIWI, 2001). Au Burkina Faso, Somé (1989) a pu montrer à travers des essais menés en milieu réel sur le sorgho que la pratique de l'irrigation de complément peut augmenter le rendement jusqu'à 80% selon la saison agricole. De même, l'étude expérimentale réalisée par Fox et Rockström (2000) sur le sorgho en zone sahélienne burkinabè a révélé une augmentation du rendement de l'ordre de 40%. Fox *et al.* (2005) ont montré que l'irrigation d'appoint durant les poches de sécheresse à partir des ouvrages de collecte des eaux de ruissellement (*boullis*) a permis l'amélioration des rendements agricoles (Dembélé *et al.*, 1999 ; Filali, 2002 ; Rockström *et al.*, 2002). Ces *boullis* de faible capacité et destinés principalement au pastoralisme, ne permettent pas la pratique de l'irrigation de complément, car ne constituant pas des ouvrages individuels. Or, les paysages sahéliens du Burkina Faso présentent des conditions favorables à l'implémentation des technologies de collecte des eaux de ruissellement à l'échelle d'une parcelle. En effet, l'importance du ruissellement (15 à 40%) couplée à l'intensité des pluies et aux caractéristiques physiques du paysage (pente 1-3%, sols de texture sablo-limoneuse) constituent des atouts pour la mise en place des bassins de rétention d'eau afin d'atténuer les effets des poches de sécheresse intra-saisonnières (Fox et Rockström, 2003). C'est ce qui a poussé l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) en collaboration avec le Centre de Recherche pour le Développement International du Canada (CRDI) à implémenté le programme «Irrigation de Complément» dans la zone sahélienne du Burkina Faso. La démarche de ce projet consiste à doter chaque exploitation familiale, à travers un travail communautaire, des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER)

totallement imperméabilisés avec bâche ou partiellement imperméabilisés avec des matériaux locaux (argile, moellons, graviers). L'eau stockée est utilisée pour l'irrigation des cultures pluviales comme le maïs durant les poches de sécheresse. Cependant, l'alimentation hydrique des cultures et en particulier du maïs est fortement tributaire de la capacité de stockage du « réservoir sol », de la fréquence et de l'amplitude des épisodes secs, des pratiques culturales, de la profondeur d'enracinement de la culture et du volume d'eau disponible dans le BCER. Ainsi, la mise en place de scénarii d'irrigation de complément en zone sahélienne du Burkina Faso doit reposer sur la réponse des sols sous irrigation à l'évolution des séquences sèches concomitamment à la phénologie de la culture et de la disponibilité en eau du BCER. Ce qui revient alors à simuler les variables de forçage climatiques (pluie, évaporation) pour isoler le temps de redistribution de l'eau dans le sol en présence et le type de séquence sèche couverte. L'hypothèse posée étant que : disposer de suffisamment d'eau n'est pas une fin en soi alors que, l'avoir au bon endroit et au moment opportun est une stratégie souhaitable. De là, montrer que l'irrigation de complément à partir des BCER améliore les rendements agricoles n'est plus une problématique à rechercher ; mais, chercher à évaluer la contribution de ces bassins partiellement perméables à la mitigation des effets liés aux fréquentes poches de sécheresse constitue un «challenge» pour la recherche. Ainsi, cette étude tente d'analyser l'efficience et l'optimisation de la technologie mise en place au niveau des parcelles de l'exploitation agricole familiale. De là, cette étude se pose les questions suivantes :

- ✚ **Q1** : le bassin individuel de collecte des eaux de ruissellement pour l'irrigation de complément répond-t-il aux conditions agroclimatiques du Sahel Burkinabè ?
- ✚ **Q2** : quel est le bilan d'eau sur le bassin de collecte des eaux de ruissellement ?
- ✚ **Q3** : quel est le rôle de la modélisation numérique dans l'optimisation des apports d'eau complémentaires via les bassins de collecte des eaux de ruissellement au Sahel Burkinabè ?

Objectifs et hypothèses de recherche

L'objectif global que s'est assigné cette étude conduite sur trois campagnes d'expérimentation (2012, 2013 et 2014) est de renforcer les capacités d'adaptation des populations face aux effets néfastes des poches de sécheresse en accroissant et sécurisant durablement leurs productions agricoles par la mise en place d'un système d'irrigation de complément à partir des bassins individuels de rétention d'eau. En d'autre terme, il s'agit d'évaluer la contribution des petits bassins individuels à l'atténuation des poches de sécheresse au Sahel Burkinabè. Cet objectif implique deux axes d'analyse : une contribution agronomique et une contribution hydrologique. La première s'intéresse à la satisfaction des besoins en eau de la culture tout au long de son cycle de développement, alors que la

deuxième étudie la place de ces bassins individuels dans la réalimentation des nappes phréatiques constituant la plus importante source d'eau potable en milieu rural sahélien.

Trois objectifs spécifiques émanent de l'objectif global et sont à la base des approches méthodologiques utilisées. Ces objectifs spécifiques (**OS**) s'énoncent comme suit :

- ✚ **OS1** : étudier l'occurrence des poches de sécheresse agronomique et leur impact en maïsiculture dans le Sahel Burkinabè ;
- ✚ **OS2** : analyser la contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement à l'alimentation hydrique du maïs sous différents scénarii d'irrigation de complément et son impact sur la dynamique de la nappe sous-jacente ;
- ✚ **OS3** : optimiser en maïsiculture le scénario d'irrigation de complément adapté aux conditions pédoclimatiques du Sahel Burkinabè.

Pour atteindre les objectifs fixés par l'étude, les hypothèses (**H**) suivantes ont été formulées :

- ✚ **H₁** : le bassin individuel de collecte des eaux de ruissellement est adapté à l'irrigation de complément en zone sahélienne Burkinabè ;
- ✚ **H₂** : le bassin individuel de collecte des eaux de ruissellement permet la recharge de la nappe sous-jacente ;
- ✚ **H₃** : la modélisation numérique est un outil d'aide à la décision pour optimiser les apports d'eau en irrigation de complément via les bassins de collecte des eaux de ruissellement.

Structuration du document

Le présent document est structuré en six chapitres:

Les chapitres 1 à 3 rapportent non seulement la problématique du changement climatique et une synthèse bibliographique des travaux effectués sur l'importance de l'irrigation de complément pour l'agriculture durable dans un contexte de variabilité climatique, mais également le formalisme régissant les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère ainsi qu'une caractérisation pédoclimatique et socioéconomique générale de la zone d'étude.

Le chapitre 4 expose une description détaillée de l'approche méthodologique adoptée à travers une étude statistique de la campagne agricole et une étude expérimentale de l'irrigation de complément ainsi que la procédure d'optimisation du scénario d'irrigation de complément.

Les résultats obtenus ont été présentés et discutés dans les chapitres 5 et 6 du présent document. Ces résultats portent essentiellement sur les dates de début, de fin et la longueur de la campagne agricole ainsi que la distribution statistique des séquences sèches décennales d'une part et la contribution des BCER à l'atténuation des effets des séquences

sèches en agriculture pluviale d'autre part. L'analyse des résultats de l'étude des transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère et les flux d'eau en dessous des BCER a permis d'optimiser non seulement la stratégie d'irrigation de complément adaptée au Sahel Burkinabè et à la capacité des BCER, mais également la contribution de ces bassins à l'atténuation des séquences sèches et à la recharge de la nappe phréatique.

L'analyse des divers résultats obtenus à l'issue de ce travail a permis de présenter en conclusion des enseignements pour une meilleure gestion des poches de sécheresse en zone sahélienne et des perspectives de recherche.

CHAPITRE 1 : POINT DES CONNAISSANCES SUR L'AGRICULTURE FAMILIALE EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Toute région a ses défis et chaque défi fait appel à des réponses spécifiques. Dans les années 1960, la famine menaçait l'Asie du Sud. La Révolution verte était la bonne réponse à la menace de la crise alimentaire à laquelle était confronté le monde il y a un demi-siècle. Heureusement, aujourd'hui, la population n'est pas en face d'une perspective de famine à grande échelle, mais elle se trouve à la croisée des chemins.

En Afrique subsaharienne, une région particulièrement vulnérable au changement climatique et à la variabilité climatique, le défi sera encore plus grand et nécessitera la mise en place de stratégies d'adaptation durables et résilientes. Les petites exploitations familiales de l'Afrique Subsaharienne seront alors l'épine dorsale du développement d'une agriculture durable pour leur autosuffisance alimentaire. Celles-ci représentent 9% de toutes les exploitations du monde (FAO, 2014) et 80% de toutes les exploitations agricoles de l'Afrique Subsaharienne (Wiggins 2009). Ces petites exploitations agricoles familiales qui exploitent moins de 2 ha, produisent jusqu'à 90% des besoins alimentaires de certains pays de l'Afrique Subsaharienne (Wiggins, 2009 ; Wiggins et Sharda, 2013).

1.1. Petits agriculteurs, souveraineté alimentaire et défi climatique en Afrique subsaharienne

1.1.1. Situation alimentaire

L'Afrique subsaharienne est une région à croissance rapide avec plus de 800 millions de personnes et une grande diversité agro-écologique et culturelle (AGRA, 2014). La projection de la population en 2050 est de 1,5 milliards avec de profondes implications de la production agricole pour couvrir la demande en nourriture. Actuellement, selon AGRA (2014) 223 millions de personnes sont sous-alimentées, mais le changement climatique pourrait augmenter ce nombre d'environ 132 millions d'ici à 2050. Les estimations indiquent que, outre les importations élevées de denrées alimentaires de base, il faudra 360% autant de production alimentaire en 2050 qu'en 2006 pour subvenir au besoin nutritionnel de la population d'Afrique Subsaharienne (WRI, 2014). Dans cette région, les petites exploitations agricoles familiales sont les principaux producteurs de produits agricoles. Elles y représentent environ 80% de toutes les exploitations agricoles et emploient environ 175 millions de personnes dont 70% de femmes. La terminologie petites exploitations agricoles familiales dérive des petites parcelles (moins de 2 ha) souvent dégradées qu'exploitent ces dernières qui n'ont pas accès à une irrigation fiable. Les petites exploitations agricoles familiales n'ont souvent pas accès à une main d'œuvre suffisante et sont considérées comme la classe pauvre. Aussi, la plupart d'entre elles n'ont pas accès à des intrants

abordables et de crédit financier. Contraint à la pratique d'une agriculture de subsistance, leur rendement moyen tombe bien en deçà des moyennes mondiales. La productivité du travail et les revenus provenant de l'agriculture sont également très faibles par rapport à la moyenne et restent inférieurs à 200\$US par jour dont 60% sont généralement alloués à l'alimentation (AGRA, 2014).

1.1.2. Le défi climatique

Les changements climatiques vont renforcer le défi auquel sont confrontées les petites exploitations agricoles familiales en Afrique Subsaharienne. En effet, l'Afrique Subsaharienne est confrontée à un grand nombre de risques climatiques qui pourraient engendrer à long terme des conséquences sur son système agricole. Les changements rapides et incertains de la pluviométrie et de la température menacent la production alimentaire ; ce qui conduira à l'instabilité des prix alimentaires, à l'augmentation de la vulnérabilité des petites exploitations agricoles familiales, et à l'accentuation de la pauvreté rurale. Sous un réchauffement de 2°C, les variations actuelles de la disponibilité de l'eau en Afrique Subsaharienne pourraient s'accroître (World Bank, 2013). Selon les projections réalisées sous un scénario de réchauffement climatique de 4°C, une diminution jusqu'à 30% de la pluie sera observée en Afrique du Sud, pendant que l'Afrique de l'Ouest connaîtra une baisse de 50 à 70% du taux de recharge des nappes souterraines. Cela va entraîner un accroissement substantiel du risque de sécheresse aussi bien en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique centrale. La sécheresse de 2011 enregistrée dans la Corne de l'Afrique et qui a été particulièrement sévère au Kenya et en Somalie, est compatible à une augmentation de la probabilité d'échec des longues pluies sous l'influence du changement climatique d'origine anthropique (World Bank, 2013).

1.1.3. Le changement climatique et le secteur primaire

La longueur de la période de croissance, qui est un indicateur de l'adéquation de la disponibilité de l'humidité, de la température et des conditions du sol pour la croissance des cultures, devrait diminuer de 20% pour la plupart des parties de l'Afrique Subsaharienne d'ici à 2050 (Thornton *et al.*, 2011 ; Sarr, 2012). Les simulations d'un climat plus chaud indiquent que les augmentations prévues de la période végétative dans les régions de l'Afrique orientale ne se traduiront pas nécessairement par une augmentation de la productivité agricole. Par exemple, les rendements de maïs devraient diminuer de 19%, malgré des périodes de croissance plus longues (Thornton *et al.*, 2011). Le changement climatique entraînera une diminution d'environ 3% de la superficie de terres arables en Afrique Subsaharienne dont la plupart s'observeront dans la ceinture sahélienne et en Afrique australe (Lane et Jarvis, 2007). En vertu d'une pluralité de scénarios démographique à

l'horizon 2050, 35 millions d'agriculteurs sur 3% de la superficie des terres du continent sont attendus pour passer des systèmes mixtes agriculture-élevage à l'élevage uniquement (Jones et Thornton, 2008). Les changements prévus dans les écosystèmes africains pourraient conduire à une réduction de l'étendue de prairies de savane, la réduction de la disponibilité de fourrage pour les animaux en pâturage.

Nelson *et al.* (2009) ont pu prédire le rendement des principales céréales sèches cultivées en Afrique Subsaharienne sur la base de deux modèles de simulation du changement climatique, celui du Centre national de Recherche atmosphérique (NCAR) et de l'Organisation pour la Recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO). Les résultats montrent pour le maïs, le mil et le sorgho une diminution respective de 9,6% ; 6,9% et 2,3% avec CSIRO et 7,1% ; 7,6% et 3% avec NCAR à l'horizon 2050. De même selon le rapport de GIEC (2007), les rendements des récoltes de riz, de blé et de maïs en Afrique Subsaharienne vont chuter de 14%, 22% et 5% respectivement à l'horizon 2050, accentuant ainsi la paupérisation et la vulnérabilité de nombreuses personnes déjà démunies et qui sont fortement tributaires de l'agriculture essentiellement pluviale.

Aussi, le changement climatique peut entraîner la prolifération des ravageurs et des maladies qui étaient autrefois des problèmes mineurs. Ces derniers pourraient devenir des contraintes majeures pour la production agricole et l'élevage. Dans l'ensemble, les moyens de subsistance des communautés qui dépendent des écosystèmes locaux seront sévèrement touchés (World Bank, 2013).

D'après GIEC (2014), l'utilisation des terres, ses changements, l'agriculture et la forêt (UTCAF) est le secteur qui contribue plus au réchauffement climatique. L'agriculture extensive et l'élevage libèrent environ 10 à 12 équivalents Gigatonnes de CO₂ par an, soit environ 24% des gaz à effet de serre (GES). Entre 2001 et 2011, les émissions agricoles de l'Afrique ont augmenté annuellement à un taux d'environ 2% et représentent actuellement 15% des émissions mondiales de GES d'origine agricole. L'Afrique a dépassé l'Europe en tant que troisième plus grande émettrice de GES d'origine agricole depuis l'an 2000 (Tubiello *et al.*, 2014). Compte tenu de la nécessité de la croissance agricole pour la souveraineté alimentaire, les émissions agricoles de l'Afrique subsaharienne devraient croître le plus rapidement, d'environ 30% entre 2010 et 2030 (U.S.EPA, 2012). La recherche de stratégies innovantes pour réduire les effets d'un tel changement climatique sur le secteur vital de l'Afrique Subsaharienne est une nécessité. Néanmoins, des voies de solutions existent et peuvent être améliorées ou adaptées aux conditions agropédoclimatiques de l'Afrique Subsaharienne.

1.2. Quelques stratégies d'adaptation dans le secteur agricole

Malgré la vulnérabilité accrue au changement climatique des petites exploitations agricoles familiales de l'Afrique Subsaharienne, des interventions applicables à des systèmes agricoles africains existent (Velazquez, 2007 ; Rutashobya, 2008). Ces stratégies d'adaptation vont non seulement permettre d'accroître simultanément les rendements agricoles et la résilience des petites exploitations agricoles familiales au changement climatique mais également de réduire les émissions de GES, et d'accroître le stock de carbone dans le sol. Dans ce sens, la mise à disposition des informations climatiques de précampagne et le développement de systèmes de culture résilients peuvent contribuer à renforcer la capacité d'adaptation des producteurs.

1.2.1. Informations climatiques de précampagne

La détermination des paramètres agroclimatiques saisonniers (démarrage, longueur et fin de la campagne agricole) contribue à minimiser l'impact des variations climatiques sur la production agricole par la mise en place de scénarii d'adaptation aux changements climatiques. La prédiction des caractéristiques de la saison hivernale à travers la mise à disposition d'informations climatiques de précampagne est donc une préoccupation importante pour une meilleure planification de la campagne agricole surtout au Sahel. Dans ce sens, le PRESAO (Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest) est une initiative salubre. Celle-ci lancée en 1998 par un consortium comprenant notamment l'ACMAD, l'AGRHYMET, l'ABN et l'ICRISAT vise le renforcement des capacités dans le domaine de la prévision climatique par la mise à disposition d'informations climatiques saisonnières de précampagne (Niasse *et al.*, 2004). La démarche consiste à élaborer et diffuser au début de chaque saison des pluies et à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, une tendance moyenne et globale des conditions pluviométriques et d'écoulements des cours d'eau (Hamatan *et al.*, 2004). Cette prévision basée sur des modèles globaux ou régionaux permettent néanmoins aux agriculteurs, aux gestionnaires des ressources en eau et aux décideurs d'optimiser leur prise de décision. Cependant, cette caractérisation globale dépend du niveau d'analyse : agronomique, hydrologique ou climatique.

En effet, dans leur tentative d'identification d'une méthode pertinente de détermination de la période d'installation de la saison agricole au Nord du Nigéria, Ati *et al.* (2002) ont pu établir six méthodes dont les critères typologiques sont : les seuils de pluies journalières, les cumuls de pluies et de la durée des séquences sèches à considérer. Parmi ces méthodes, celle développée par Sivakumar (1988) et qualifiée de méthode agronomique est la plus exigeante. En zone sahéenne, plusieurs modèles régionaux (RACMO, RCA, HadRM3P, CCLM, REMO) sont utilisés pour appréhender ces paramètres climatiques de précampagne. En Afrique du Sud, Tadross *et al.* (2005), Moeletsi *et al.* (2011) se sont basés sur des

critères pluviométriques décennaires pour définir la date de démarrage de la maïsiculture. Celle-ci correspond à la date pour laquelle la décennie précédente enregistre 25 mm de pluie suivie de 20 jours comptabilisant au moins 20 mm de pluie. Cette considération qui n'est pas adaptée à la zone sahélienne compte tenu des contrastes climatiques a été reprise par Moeletsi et Walker (2012) pour cartographier sur la base d'indice agroclimatique simple les zones de culture du maïs pluvial dans la province de Free State en Afrique du Sud. Dans le but de caractériser la saison des pluies au Sahel Burkinabè, Ibrahim (2012) a élaboré une méthode statistique sur la base des critères agronomique et hydrologique respectivement utilisés antérieurement par Somé et Sivakumar (1994) et Balme-Debionne (2004). Cette méthode en complément à celle adoptée par Ramel (2005) en zone sahélienne utilise des proportions de cumul annuel de pluies pour discrétiser la saison. Ces méthodes de caractérisation de la campagne agricole ont montré leur potentialité à fournir des informations climatiques de pré-campagne pour une gestion efficace de la campagne agricole. Cependant, son couplage à un système de culture résilient comme l'agriculture intelligente constitue un atout pour l'augmentation des capacités d'adaptation des agricultures.

1.2.2. Utilisation des indices de sécheresse

Cette technique de mitigation des effets de la variabilité climatique basée sur les indices de sécheresse est très capitale au vu de ses multiples avantages. En effet, selon Eriksen et Kelly (2006), les indices de sécheresse permettent d'appréhender rapidement le phénomène en cause et des prises de décision adéquate par les décideurs. Au niveau régional, ces indices permettent des comparaisons entre zones et par surcroît à identifier les zones à risques. Grâce aux indices de sécheresse, les hétérogénéités à l'échelle locale peuvent être identifiées. Ce qui permettra une planification des stratégies d'adaptation. Les indices de sécheresse sont nombreux et la plupart ont été expérimentés dans des programmes du suivi de la sécheresse aux USA (Richard et Heim, 2002). Néanmoins, l'USAID a créé le FEWS NET dans les années 1980 pour la mise en œuvre d'un programme d'atténuation des chocs agrométéorologiques sur la vulnérabilité des populations, particulièrement dans la souveraineté alimentaire des pays africains et latino-américains. Les objectifs du FEWS NET sont triples (Funk et Verdin, 2010): identification de la vulnérabilité et de l'évaluation de l'impact, le développement d'un plan de contingence appropriée, la conception et l'exécution en temps opportun des plans d'assistance en cas de catastrophes.

Pour l'implémentation de ses objectifs, le FEWS NET utilise des images satellitaires pour cartographier sur la base d'indice (WRSI), le risque de stress hydrique des cultures. Cependant, la mise en œuvre de cette stratégie d'adaptation reste régionale et des efforts doivent être accomplis pour la création des cartes locales de haute résolution incorporant les

données des stations. Chose difficilement réalisable dans le contexte actuel des pays subsahariens où la problématique d'acquisition de données de longue durée et de qualité reste d'actualité. Aussi, le système de communication et le faible niveau d'instruction des utilisateurs de l'outil constituent autant de limites pour sa mise en œuvre en Afrique subsaharienne.

1.2.3. Agriculture intelligente

L'agriculture intelligente est une approche pour relever les défis de la souveraineté alimentaire dans le cadre des nouvelles contraintes du changement climatique (Scherr *et al.*, 2012). Cette approche identifie les synergies et les compromis entre la souveraineté alimentaire, l'adaptation et l'atténuation comme une base pour réorienter les politiques et les pratiques agricoles en réponse au changement climatique. Des exemples d'agriculture intelligente comprennent l'amélioration de l'efficacité de l'eau et l'utilisation des intrants, l'utilisation de diverses variétés, la gestion intégrée des ravageurs et des cultures. Avec l'agriculture intelligente, les menaces du changement climatique peuvent être réduites en augmentant la capacité d'adaptation des agriculteurs. Or, les décideurs et les développeurs considèrent encore les petites exploitations agricoles familiales comme la force motrice de la croissance économique et la réduction de la pauvreté en Afrique. La croissance du PIB provenant de l'agriculture est de 2-4 fois plus efficace pour augmenter les revenus des personnes extrêmement pauvres que la croissance du PIB provenant de l'extérieur du secteur (AGRA, 2014). Il est donc nécessaire de promouvoir l'adoption des pratiques d'agriculture intelligente par les petites exploitations agricoles familiales; ce qui nécessitera un soutien public fort, avec un meilleur accès aux technologies améliorées et aux marchés locaux et internationaux.

Cependant une agriculture productive et résiliente passe d'abord par une réorganisation de la gestion des ressources naturelles et surtout une utilisation efficace et efficiente de l'eau qui s'amenuise de jour en jour. Pour cela, un fond d'adaptation aux changements climatiques est nécessaire (FAO, 2009) et des « traducteurs » d'informations climatiques doivent être développés et vulgarisés en milieu paysan (Hansen *et al.*, 2007). Dans ce sens le développement de l'irrigation d'appoint par des méthodes modernes de pilotage peut jouer un grand rôle dans la transformation des petits systèmes de production agricole tels que les petites exploitations agricoles familiales. Cette évolution de l'agriculture vers des systèmes résilients présente un double avantage. Sur le plan environnemental, cette transformation va favoriser l'atténuation de l'émission des gaz à effet de serre (GES) par l'augmentation des puits de carbone. Sur le plan social, elle va permettre non seulement d'assurer la souveraineté alimentaire des Unités Domestiques de Production, mais aussi la lutte contre la

pauvreté, la croissance générale et le changement structurel (World Bank, 2008; Burney *et al.*, 2010; Bellassen *et al.*, 2010).

1.3. Variabilité climatique et irrigation de complément

L'augmentation des températures et les changements dans les régimes de pluies ont des effets directs sur le rendement des cultures, et des effets indirects sur l'approvisionnement alimentaire dus aux changements dans la disponibilité d'eau pour l'irrigation. Dans de nombreuses régions du monde, où la productivité agricole est déjà faible et les moyens de faire face aux événements néfastes sont limités, la variabilité climatique risque d'aggraver les niveaux de productivité et de rendre la production encore plus irrégulière (Fischer *et al.*, 2002; Stern *et al.*, 2006; Cline, 2007; GIEC, 2007). En effet, l'amélioration et la stabilisation de la production agricole ont été depuis toujours les préoccupations majeures du chercheur et de l'agriculteur, lesquelles sont généralement tributaires d'un certain nombre de facteurs dont l'eau peut être le facteur le plus limitant. La régularisation et l'augmentation des rendements sont donc directement liées à la bonne maîtrise du cycle de l'eau. Ainsi, dans le contexte actuel de la variabilité climatique, l'irrigation classique qui consiste à apporter de l'eau tout au long du cycle cultural pour satisfaire les besoins en eau de la culture devrait disparaître pour laisser place à la promotion de la petite irrigation où la quantité d'eau, la fréquence des apports et les périodes d'apport sont contrôlées. Cependant, la réussite d'une telle stratégie d'adaptation à la variabilité climatique va fortement dépendre de l'analyse faite sur l'une de ses manifestations : la sécheresse qui impacte significativement les activités agricoles en Afrique Subsaharienne.

1.3.1. Concept de sécheresse en agriculture pluviale

La définition la plus courante est bien sûr celle liée à un déficit pluviométrique. Elle ne doit pas être confondue à l'aridité, car cette dernière émane d'un déficit systématique alors que la sécheresse est conjoncturelle. La sécheresse abordée dans ce document n'est pas celle caractérisant les zones désertiques ou arides, mais celle correspondant à un épisode et classée par les climatologues comme événements extrêmes. La caractérisation de la sécheresse en tant qu'événement extrême est limitée jusque-là à la durée des épisodes secs basée sur des critères tels que le déficit pluviométrique ou climatique (l'écart de l'évapotranspiration de référence à la pluie). Cependant, cette considération climatique ne permet pas d'analyser les incidences de la sécheresse sur l'agriculture. Dans ce sens, les propriétés du sol et de la culture doivent être intégrées dans la caractérisation de la sécheresse. Ainsi, deux types de sécheresse peuvent être considérés : la sécheresse édaphique et la sécheresse hydrologique.

1.3.1.1. La sécheresse édaphique

Les termes de sécheresse édaphique ne sont pas aussi distincts car le seuillage d'occurrence de la première dépend des exigences de la deuxième sous des contraintes climatiques données. Ainsi, pendant que les sécheresses atmosphérique et météorologique sont respectivement caractérisées par le déficit de saturation de l'air et de la pluie celle édaphique s'intéresse à l'eau dans le « réservoir sol » de la plante et par surcroît les besoins en eau des cultures. C'est la sécheresse classique en agriculture qui peut se définir selon :

- ✚ l'état hydrique du sol, caractérisé par sa teneur en eau ou son potentiel hydrique mesuré par un dispositif tensio-neutronique.
- ✚ le contenu en eau du sol disponible pour les cultures, caractérisé par l'état de la réserve du sol par rapport à son niveau de remplissage maximal ou par rapport à des seuils de tarissement de l'eau du sol. Ces seuils sont définis par référence aux conséquences physiologiques du manque d'eau.

Pour exprimer l'état de remplissage du sol, les écophysiologistes utilisent la réserve en eau relative notée REW (Relative Extractable Water). C'est une grandeur adimensionnelle, calculée pour le jour j selon la formule suivante (Granier *et al.*, 1995):

$$REW = \frac{S_j - S_{pF4,2}}{RU} \quad (1-1)$$

où: S_j (mm) est le stock d'eau du sol au jour j calculée sur la profondeur d'enracinement ; $S_{pF4,2}$ (mm) est le stock d'eau au point de flétrissement permanent déterminé sur la même profondeur d'enracinement ; RU (mm) est la réserve utile du sol et correspond à la quantité totale d'eau que peut retenir le sol en absence de condition asphyxiante.

La réserve en eau relative, une grandeur comprise entre 1, lorsque le sol est à la capacité au champ, et 0 lorsqu'il est au point de flétrissement permanent, nécessite donc l'établissement d'un bilan hydrique journalier.

1.3.1.2. La sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique affecte les réserves hydrographiques dont le niveau ou le débit montre une valeur inférieure à celle habituellement mesurée à la même période. Elle résulte en grande partie de l'insuffisance des pluies. L'assèchement de l'eau du réseau hydrographique peut être partiel ou total selon l'intensité et la durée de la sécheresse. Si c'est l'aquifère qui est affecté, nous sommes dans un cas de sécheresse phréatique.

Comparativement à la sécheresse édaphique qui affecte directement la production agricole, la sécheresse hydrologique quant à elle impacte indirectement la production agricole par la disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

1.3.2. Irrigation de complément et rendement des cultures pluviales

Bien que l'application soit récente, le concept de l'irrigation de complément semble être très ancien et nombreuses sont les recherches qui ont montré l'intérêt de ce type d'irrigation non seulement dans l'augmentation et la stabilisation des rendements, mais aussi dans l'utilisation efficiente des ressources en eau. En effet, à travers certaines études réalisées au Maroc sur le blé, les chercheurs ont mis en évidence la supériorité de l'irrigation de complément dans l'amélioration et la stabilisation du rendement dans différentes zones agro-écologiques du pays (El Ghali, 1992; Benbella *et al.*, 2003). L'amélioration des rendements par rapport aux témoins sous régime pluvial a varié de 2000 à 3500 kg.ha⁻¹ pour le grain et de 3500 à 10000 kg.ha⁻¹ pour la biomasse totale (Boubagra et Souley, 2000). Les études entreprises par les chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) au Maroc, ont également démontré qu'une seule irrigation d'appoint de 60 mm, a engendré une augmentation du rendement de 50 à 100% par rapport au témoin pluvial et peut produire jusqu'à 80% du potentiel permis par l'irrigation à l'évapotranspiration maximale. Les apports hydriques au début du cycle comparés à ceux du milieu et à la fin du cycle sont 4 fois sur 5 les plus productifs et 3 fois sur 5 les plus efficaces (Belbsir, 1990; El Ghali, 1992). En outre, Benbella *et al.* (2003) ont pu montrer à l'issue des études réalisées sur le blé au Maroc, que l'irrigation de complément améliore significativement les rendements mais ne compense pas les pertes de rendement engendrées par la tardivité des semis. Autrement dit, l'eau d'irrigation est mieux valorisée en semis précoce qu'en semis tardif.

Une étude réalisée dans une plaine semi-aride d'Algérie sur le comportement du blé dur a révélé que la conduite en régime hydrique potentiel aboutit à des rendements en grains compris entre 5400 et 5900 kg.ha⁻¹, avec une moindre variabilité interannuelle alors que la conduite pluviale aboutit à des rendements qui varient entre 1500 et 3000 kg.ha⁻¹ avec une forte variabilité interannuelle (Mekliche *et al.*, 2003; Merabet et Boutiba, 2005). Ainsi, la mise en œuvre de l'irrigation de complément augmente le rendement et réduit sensiblement sa variabilité interannuelle. En outre, Abu-Awwad (1998) a montré à travers une étude réalisée sur l'orge en milieu aride qu'en absence d'irrigation de complément, les rendements en grains et en pailles de l'orge sont nuls sous une pluie totale de 136,5 mm. Cependant, avec une irrigation de complément de 167 mm par aspersion, les rendements en grains et en pailles sont respectivement de 190 et 1090 kg.ha⁻¹, alors que cet appoint d'eau en système d'irrigation par sillons sans réseau de colature augmente significativement ces rendements qui passent respectivement à 590 et 1800 kg.ha⁻¹. Cette amélioration est due à l'augmentation de la capacité de stockage de l'eau associée à l'irrigation par sillons.

Par ailleurs, les travaux réalisés par le Comité National des Irrigants et du Drainage du Burkina (CNID-B) et de l'Autorité de Mise en Valeur de la vallée du Sourou (AMVS) sur le

maïs de la campagne 2008-2009 ont montré que le rendement en grain est de 3490 kg.ha⁻¹ pour la parcelle sous irrigation de complément contre 2300 kg.ha⁻¹ pour le témoin pluvial. De même Somé et Ouattara (2005) ont mené une étude comparative de l'effet de l'irrigation de complément sur le sorgho avec les impacts liés à deux techniques d'économie en eau éprouvées en cultures pluviales que sont : le labour suivi de buttage cloisonné et les semis sur des billons cloisonnés en zone nord-soudanienne et en zone sahélienne. Les résultats de leurs travaux ont montré qu'en zone plus humide, les techniques économes d'eau éprouvées en cultures pluviales ont induit des rendements en sorgho-grain significativement supérieurs à ceux obtenus avec l'apport d'une irrigation de complément de 53 mm pendant les «trous pluviométriques». Par contre en zone sahélienne, l'irrigation de complément s'est avérée meilleure aux techniques d'économie d'eau pratiquées en cultures pluviales. Ce qui confirme la nécessité de l'irrigation de complément pour augmenter les rendements des cultures en zone sahélienne où les poches de sécheresse sont plus longues.

Nombreuses sont donc les études qui ont été réalisées pour démontrer l'effet significatif de l'irrigation de complément dans l'amélioration et la stabilisation du rendement des cultures. Cependant, très peu sont celles qui, en zone sahélienne, ont abordé la stratégie de mobilisation et de gestion de l'eau à travers une technique moderne de pilotage de l'irrigation de complément pour améliorer et optimiser les techniques endogènes de conservation de l'eau sur la parcelle cultivée. De plus, c'est en particulier dans cette zone que l'adaptation du secteur agricole aux changements climatiques n'est pas une option mais une obligation indispensable à la survie. Néanmoins, des études (Zoungrana, 2004 ; Kini, 2007 ; Ouédraogo *et al.*, 2010) ont démontré que les agriculteurs sont ouverts à l'adoption de toute technologie pertinente pouvant les aider à faire face à la variabilité des pluies plus précisément la pratique de l'irrigation de complément (Zongo *et al.*, 2015). Dans ce contexte, l'élaboration d'une technique pertinente et adaptée aux agriculteurs pour valoriser le mètre cube d'eau constituera le défi à relever pour assurer leur souveraineté alimentaire.

1.3.3. Irrigation et souveraineté alimentaire

L'inégalité de la répartition de la ressource en eau à l'échelle mondiale et la variabilité interannuelle des précipitations aggravent souvent la disponibilité de cette ressource (Cramer, 1996 ; Riou, 1998) et deviendra certainement le principal obstacle à la souveraineté alimentaire et au développement socio-économique dans les zones semi-arides et arides où l'irrigation de complément constituerait la meilleure alternative pour pallier ces conséquences.

En effet, l'irrigation concerne 18% des terres cultivées et assure plus de 40% de l'alimentation mondiale (Jamin *et al.*, 2011). Même si une revue de littérature concernant les

impacts de l'agriculture irriguée sur la pauvreté peut conclure à des résultats mitigés, le développement de l'irrigation, en permettant des gains de productivité, la réduction des risques climatiques, ainsi qu'une meilleure situation de l'emploi tout au long de l'année, apparaît comme un moyen d'améliorer la souveraineté alimentaire des populations (Intizar et Muni, 2004 ; Gebregziabher *et al.*, 2009). Plusieurs études qui ont montré l'impact de l'irrigation dans la réduction de la pauvreté des populations. En 2004, l'Institut d'Economie Rurale a démontré à travers une étude réalisée à l'Office du Niger, sur un vaste périmètre hydroagricole mis en valeur par de petites exploitations agricoles familiales au Mali, que le développement de l'irrigation a généré une forte croissance des productions agricoles. Cet Office fournit 40 à 50% de la production nationale de riz-paddy et partant une réduction de la pauvreté au sein des petites exploitations agricoles familiales (Kébé *et al.*, 2005). D'autres études ont également montré qu'il y a de fortes connections entre l'irrigation et la pauvreté. Ces connections sont à la fois directes et indirectes (Jamin, 1994 ; Mariko *et al.*, 2001). Les connections directes agissent à travers des effets localisés et à l'échelle des foyers, tandis que les connections indirectes opèrent à travers des impacts collectifs ou à l'échelle sub-nationale et nationale. De plus, selon la FAO (2010), l'irrigation permet aux petites exploitations agricoles familiales d'adopter des cultures plus diversifiées et de passer d'une production de subsistance, de faible valeur, à une production de forte valeur, orientée vers le marché. L'augmentation de la production donne ainsi accès aux pauvres à une nourriture abordable. Des études réalisées par Bouman *et al.* (2007) dans des pays asiatiques supportent fortement le fait que l'irrigation aide à réduire à la fois la pauvreté permanente et temporaire. Au-delà de ceci, l'irrigation aide à alléger la pauvreté dans ses pires formes, notamment la pauvreté chronique. Au total, l'irrigation augmente la productivité, favorise la croissance et réduit la pauvreté.

Cependant, certaines de ces études ont également dégagé les limites des projets d'aménagement de grands périmètres irrigués dans la contribution à la réduction de la pauvreté. Elles ont montré que cette contribution s'érode avec la croissance de la population et une dégradation des conditions de production qui conduisent à une baisse des superficies attribuées aux Unités de Production Agricole, tandis que de nouvelles attributions sont accordées au secteur privé (Bourguignon *et al.*, 2007 ; Bélières *et al.*, 2011). Cette érosion des conditions de production est également renforcée par la baisse des investissements publics au vu des résultats mitigés fournis par l'agriculture irriguée. Cette situation émane du système complexe de fonctionnement des périmètres irrigués qui placent généralement les Unités de Production Agricole dans une situation de dépendance totale au sein du réseau hydraulique vis-à-vis des règles d'allocation des terres et de distribution de l'eau (Vien, 2003; Chính, 2008 ; Jourdain *et al.*, 2011) et d'interdépendance par rapport au tour d'eau (Rey,

1996). Ainsi, pour pallier l'absence d'interventions sur des réseaux collectifs défailants ou inadaptés, l'irrigation individuelle s'est développée au sein même des périmètres collectifs, en exploitant directement rivières et nappes (Jamin *et al.*, 2011). Cette innovation, qualifiée de « groundwater revolution » par Giordano et Villholth (2007) ou de « groundwater economy » par Shah (2007), est générale et sans précédent dans l'histoire de l'irrigation. Cette irrigation individuelle, devenue majoritaire en France (Gleyses et Rieu, 2004), concerne la moitié des superficies irriguées en Asie du Sud (Giordano et Villholth, 2007), l'une des régions les plus irriguées du monde; elle est également très importante dans les pays au sud du Sahara (Kuper *et al.*, 2009). Cependant, l'accès à ces sources d'eau est très limité en Afrique Subsaharienne qui est obligée de trouver une autre technique de mobilisation d'eau à la parcelle. Dans ce sens, les techniques de collecte d'eau de surface constituent une alternative à développer surtout dans sa partie sahélienne où les champs sous cultures pluviales sont généralement surmontés d'impluviums peu perméables pouvant engendrer un taux de ruissellement de l'ordre de 40% (Niang, 2006).

1.4. Collecte des eaux de surface (CES) en Afrique sub-saharienne

1.4.1. Concept de CES et typologie des techniques y afférentes

Le concept de « collecte des eaux de surface » est défini dans son sens général selon la FAO comme la collecte des eaux de ruissellement pour un usage productif. Ces eaux de ruissellement sont collectées à partir d'impluviums tels que la toiture des maisons et des surfaces non cultivées ou à partir des cours d'eau intermittents ou temporaires. Cette utilisation productive des eaux de ruissellement prend en compte le stockage de l'eau pour les besoins domestiques et leur conservation pour l'arrosage des cultures (Chrichley *et al.*, 1992).

En Afrique Subsaharienne, plusieurs techniques de collecte des eaux de surface ont été développées aussi bien par les paysans que par des organismes étatiques ou privés surtout dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes. Une variété de techniques endogènes et novatrices existent dans divers pays d'Afrique comme le Burkina Faso, l'Ethiopie, le Kenya, le Niger, le Sénégal, l'Afrique du Sud, le Soudan, la Tanzanie, l'Ouganda, le Botswana, le Burundi, le Malawi, le Mali, le Mozambique, la Namibie, le Rwanda, la Zambie et le Zimbabwe. Plusieurs études (FAO, 1990 et 1991 ; Kiepe, 1995 ; FAO, 2001 ; Abdulkadir et Schultz, 2005 ; Birhane *et al.*, 2006 ; Aerts *et al.*, 2007 ; Nyssen *et al.*, 2011) ont été menées sur les techniques de collectes des eaux de surface en Afrique Subsaharienne pour faire ressortir non seulement le protocole de mise en place, mais également les performances hydriques et agronomiques. De ces études, les différentes techniques rencontrées dans les pays de l'Afrique Subsaharienne peuvent être regroupées en quatre

grandes catégories sur la base de la classification faite par Biazin *et al.* (2012). Il s'agit d'une part des micro-captages, collectant l'eau à l'intérieur des parcelles cultivées et des macro-captages collectant l'eau d'un bassin versant, et d'autre part des barrages/bassins collectant l'eau à l'intérieur d'impluvium peu perméable et des techniques augmentant la disponibilité de l'eau dans le sol. Les micro-captages permettent un stockage d'eau dans le sol pour la mitigation des poches de sécheresse durant la saison agricole. Les macro-captages quant à eux assurent la collecte des eaux de ruissellement dans des structures de stockage pour la pratique de l'irrigation de complément.

1.4.1.1. Les micro-captages

Ce sont des systèmes qui sont aménagés à l'intérieur des parcelles cultivées pour la collecte des eaux de ruissellement provenant des environs de la zone cultivée et sur des espaces supportant une végétation arborée et arbustive éparse. Ces systèmes sont composés de petites structures caractérisées par une surface de captage relativement faible. Les technologies généralement rencontrées sont le *zaï* (Burkina Faso) ou le *tassa* (Niger) et les demi-lunes (**Figure 1-1**). Ils sont plus appropriés pour les zones à faibles précipitations comme la zone sahélienne.

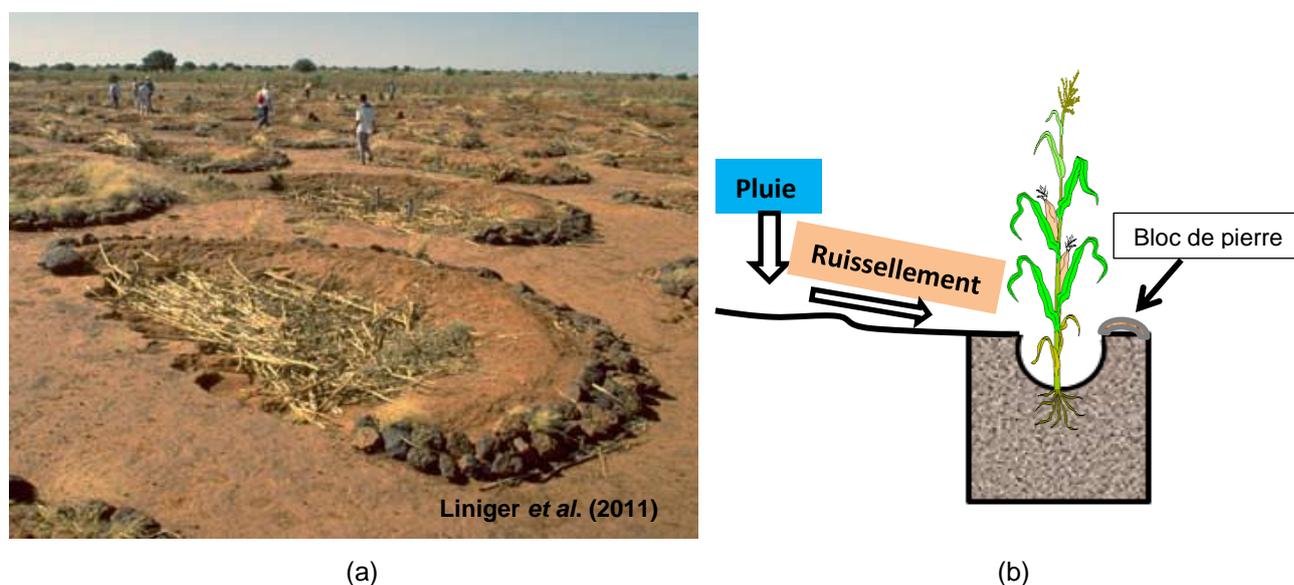


Figure 1-1 : Demi-lune (a) et schéma des micro-captages (b) en zone semi-aride

1.4.1.2. Les macro-captages

Ce sont des systèmes qui sont caractérisés par un impluvium plus grand situé à l'extérieur des terres arables. Ils sont conçus pour l'alimentation hydrique des cultures pluviales et du bétail. Les ravines, les ruisseaux temporaires ou les routes drainent l'eau vers les macro-captages qui à son tour l'achemine sur les parcelles agricoles. Les macro-captages incluent les techniques courantes comme : les barrages de contrôle et les canaux ou fossés de

déviations d'eau. Ils sont très adaptés aux régions où les événements pluvieux sont très rares et peuvent être mis en place dans les dépressions ou les vallées.

1.4.1.3. Les petits barrages et les bassins

Ces systèmes sont caractérisés par une surface de captage constituée d'impluvium (flancs de coteau, les routes, les zones rocheuses et les pâturages ouverts) située en amont des parcelles cultivées et d'un réservoir (bassins, barrage) de stockage des eaux de ruissellement. L'eau stockée dans ces structures (**Figure 1-2**) est destinée non seulement à l'irrigation des cultures pluviales mais également à l'abreuvement du bétail et pour des usages domestiques en périodes sèches.



Petit barrage pour l'alimentation du bétail et l'irrigation des cultures



Bassin de collecte des eaux de surface au Rwanda

Figure 1-2: Structure de stockage des eaux de ruissellement

Source : *Liniger et al. (2011)*

1.4.1.4. Les techniques augmentant la disponibilité de l'eau dans le sol

Ce sont des pratiques culturales qui ont pour but de favoriser l'infiltration par réduction du ruissellement et de l'évaporation afin d'augmenter la rétention en eau du sol dans la zone racinaire des cultures annuelles. Elles sont connues comme étant des techniques *in situ* de collecte des eaux de pluie (Ngigi *et al.*, 2005) et non des eaux de ruissellement. Ces techniques qui permettent de transformer l'eau bleue (pluie) en eau verte (transpiration) regroupent le billonnage/buttage, le paillage, le labour de conservation et les divers types de sillons/raies.

Des détails complémentaires sur les techniques de collecte des eaux de pluie et de surface en Afrique Subsaharienne peuvent être trouvés dans l'article de *Liniger et al (2011)* ; *Biazin et al. (2012)*.

1.4.2. Adoption et reproductibilité des techniques de collecte des eaux de surface

Le taux d'adoption est généralement faible. Ce résultat émane du fait que la sécurité foncière n'est pas assurée pour tous les bénéficiaires ainsi que le rétrécissement des opportunités d'écoulement des excédents de récolte. Le manque d'informations, le renforcement des capacités et le partage d'expériences sur les techniques de CES sont des contraintes additionnelles qui limitent le processus d'adoption et la reproductibilité des CES. Malgré ces barrières, certaines techniques comme le *zaï* et les cordons pierreux ont été largement adoptées au Burkina Faso grâce à la technique de partage d'expériences entre agriculteurs.

Un bon nombre de facteurs doivent être pris en compte pour faciliter le transfert des technologies à grande échelle. Il s'agit de la rentabilité, du niveau d'entretien, la sécurité foncière et l'accès au marché. Du point de vue rentabilité et du niveau d'entretien, les technologies proposées doivent être simples, peu coûteuses et faciles à gérer aussi bien au niveau de l'Unité Familiale de Production que communautaire. Pendant que l'assurance de la sécurité foncière motive les Unités Domestiques de Production à investir dans les techniques de CES, l'accès au marché va leur permettre de passer progressivement d'une agriculture de subsistance à une agriculture commerciale. L'approche participative doit être préférée à celle dirigiste dans la mise en œuvre des projets de collecte des eaux de surface afin d'assurer la durabilité des actions.

1.5. Place de la présente recherche face au défi climatique en Afrique Subsaharienne

L'enjeu est maintenant de trouver des systèmes agricoles qui sont vraiment durables et inclusifs et qu'un soutien accru soit accordé aux petites exploitations agricoles familiales afin de pouvoir répondre aux besoins alimentaires futurs de la planète. Rien ne rapproche le paradigme de la production alimentaire durable à l'agriculture familiale. Il est normal que les Nations Unies aient déclaré 2014 comme année internationale de l'agriculture familiale. Ceci a été l'occasion de souligner le rôle que les petites exploitations agricoles familiales - un secteur qui comprend les agriculteurs de petite et moyenne taille, les peuples autochtones, les communautés traditionnelles, les pêcheurs, les éleveurs, les habitants des forêts, cueilleurs et bien d'autres - jouent dans la souveraineté alimentaire et le développement durable. Cela doit être un effort mené non seulement par le gouvernement mais aussi toutes les organisations connexes telles que : les organisations internationales, les organismes régionaux, les organisations de la société civile, le secteur privé et les institutions de recherche. Dans ce sens, l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement et le Centre de Recherche pour le Développement International apportent leur pierre à l'édifice à travers cette recherche en milieu réel sur la contribution de l'irrigation de complément à

partir des bassins individuels de collecte des eaux de ruissellement à la souveraineté alimentaire en zone semi-aride.

Cependant, la réussite d'une telle technologie est tributaire du comportement hydrodynamique des sols aussi bien sous irrigation de complément que ceux supportant les bassins de collecte des eaux de ruissellement. Ce qui sous-entend une connaissance approfondie du processus de transfert de l'eau dans les sols en cause afin d'être à même d'analyser leur réaction à l'évolution des conditions pluviométriques intra-saisonnières et de proposer un mode de gestion efficient des irrigations de complément en condition d'eau limitée.

Conclusion partielle

A travers ce chapitre, la problématique du changement climatique et le défi climatique auquel sont confrontées les petites exploitations agricoles constituant l'épine dorsale de l'agriculture durable en Afrique subsaharienne ont été circonscrits. Le changement climatique est réel et affecte déjà l'agriculture subsaharienne comme l'a su bien montré ce chapitre. Des voies d'atténuation de l'effet de la variabilité climatique et du changement climatique dans le secteur agricole ont été également exposées dans ce présent chapitre. Parmi ces stratégies, l'irrigation de complément peut constituer la meilleure alternative puisque des techniques de collecte des eaux de surface pouvant permettre l'opérationnalisation de cette stratégie d'irrigation de complément existent et peuvent être bien adoptées en Afrique subsaharienne.

CHAPITRE 2 : PROCESSUS PHYSIQUE ET NUMERIQUE DE TRANSFERT D'EAU DANS LE SOL

L'étude de la redistribution de l'eau dans la zone insaturée est très délicate et seule une modélisation conséquente de cette zone aussi complexe peut permettre de mieux appréhender le processus. Ce chapitre aborde le formalisme qui sous-tend la dynamique de l'eau dans un milieu poreux variablement saturé. Des informations détaillées sur la présentation du milieu poreux non saturé et la modélisation numérique des transferts d'eau en condition insaturée peuvent être consultées dans les travaux de Diaw (1996).

2.1. Transferts d'eau dans un sol variablement saturé

La redistribution de l'eau arrivant au sol est largement conditionnée par les propriétés physiques (rétention hydrique, conductivité hydraulique) des sols. Ces propriétés sont contrôlées par la structure et la texture des milieux poreux, très variables tant verticalement (selon les horizons dans les profils de sol) que latéralement (suivant les conditions de dépôt et les formations superficielles).

La plupart des processus de transfert d'eau dans les sols se déroulent dans des conditions caractérisées par une teneur en eau inférieure à la saturation (Musy et Soutter, 1991).

2.1.1. Variables de base et équation générale de l'écoulement de l'eau

Au niveau du formalisme, le sol est considéré comme un milieu poreux, homogène, incompressible et isotrope. A tout instant, l'état hydrique du milieu poreux, non saturé peut être défini par ses variables d'états : la teneur en eau volumique θ [L^3L^{-3}] et la pression matricielle h [L].

Les lois de transfert d'eau dans le sol sont régies par l'équation de Darcy et la conservation de la masse. Pour l'établissement de l'équation, l'écoulement est considéré comme monodirectionnel et vertical et les mouvements d'eau se font exclusivement en phase liquide.

2.1.1.1. Loi de Darcy- Buckingham

La première des relations d'hydrodynamique a été proposée par Darcy (1856) pour un écoulement en milieu saturé et étendue aux milieux non saturés en condition de régime permanent par Buckingham (1907):

$$\vec{q} = -K(\theta, z)\vec{\nabla}H \quad (2-1)$$

où : \vec{q} [LT^{-1}] est le flux d'eau qui traverse une section donnée par unité de temps donnée.

- $K(\theta, z)$ [LT^{-1}] : la courbe de conductivité hydraulique. Elle exprime la capacité du sol à transmettre l'eau suivant son état de saturation mesuré par θ ou h . La conductivité est minimale à saturation.
- θ [L^3L^{-3}] : la teneur en eau volumique. Elle donne le pourcentage volumique de sol occupé par l'eau.
- z [L] : la profondeur du sol.
- $\vec{\nabla}H$ [-] : le gradient de charge hydraulique. Il permet de déterminer le sens de déplacement des flux hydriques monodirectionnels lors de l'exploitation des données tensiométriques.
- H [L] : la charge hydraulique. Elle est égale à la somme du potentiel gravitaire z et du potentiel de pression matricielle h (les potentiels chimique, osmotique et d'adsorption sont supposés négligeables). La charge hydraulique est définie par :

$$H = h - z \quad (2-2)$$

La tension hydraulique ou pression matricielle h mesure l'état énergétique et traduit la plus ou moins grande saturation du sol en eau. Elle est faible dans les sols humides et augmente dans les sols secs. Elle peut être mesurée *in situ* par des tensiomètres. C'est une grandeur négative exprimée en colonne d'eau. H mesure l'énergie potentielle totale de l'eau dans le sol à l'instant t et à la profondeur z .

Etant donné que les variables d'états du sol (flux, potentiel, teneur en eau) changent au cours du temps, la condition de régime permanent sous laquelle est établie la loi de Darcy-Buckingham est rarement vérifiée dans le sol. Ainsi, l'adaptation de l'équation de Buckingham-Darcy au régime transitoire a été proposée par Richards (1931) utilisant l'équation de conservation de la masse.

2.1.1.2. Conservation de la masse

En absence de végétation, la conservation de masse se présente comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div} \vec{q} \quad (2-3)$$

La combinaison des équations (2-1) et (2-3), conduit à l'équation générale des écoulements tridimensionnels en milieu non saturé qui est l'une des formes de l'équation de Richards :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}[K(\theta) \times \text{grad}H(\theta)] \quad (2-4)$$

En système monodimensionnel vertical, (2-4) devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (2-5)$$

L'équation de Richards (2-5) est une équation non-linéaire dont la résolution nécessite en général des moyens numériques par exemple le code numérique HYDRUS-2D/3D et ses

versions antérieurs (Šimůnek *et al.*, 2008a ; Šimůnek *et al.*, 2012). Elle permet de déterminer la distribution de la charge hydraulique totale et de la teneur en eau dans le sol. La résolution de l'équation est néanmoins très sensible à la détermination des courbes caractéristiques du sol (courbes de conductivité hydraulique et de rétention hydrique), en particulier au voisinage de la saturation.

2.1.2. Importance des courbes caractéristiques du sol

Si la conductivité K est connue, les flux hydriques tels que les remontées capillaires et le drainage peuvent être déduits en mesurant les paramètres de l'équation de Darcy à l'aide de tensiomètres et d'humidimètres (Musy et Soutter, 1991). La teneur en eau (θ) et la conductivité hydraulique (K) sont liées par les relations caractéristiques du milieu :

✓ La courbe de rétention $h(\theta)$ qui lie la teneur en eau volumique à la tension hydrique exprime la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de la succion exercée. Grâce à elle, il est possible de connaître les humidités volumiques correspondant aux données tensiométriques (et vice-versa). C'est une grandeur macroscopique fondamentale en physique du sol car elle exprime l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol.

✓ La courbe de conductivité hydraulique $K(\theta)$ ou $K(h)$ caractérise la capacité du milieu à transmettre l'eau en fonction de son état énergétique ou de son état de saturation.

L'importance que revêt la conductivité hydraulique pour la description de la dynamique de la phase liquide fait de sa détermination un aspect essentiel de l'évaluation des processus de transfert. La détermination de la phase liquide en laboratoire s'effectue à l'aide d'échantillons non remaniés et aussi représentatifs que possible de l'ensemble du terrain dont ils sont issus. Ces deux conditions sont en général très difficiles à respecter (ce qui induit souvent de grosses erreurs), par contre les techniques de mise en place au laboratoire sont plus simples et fournissent des mesures relativement précises. Cependant, les mesures *in situ* rendent bien compte des caractéristiques intrinsèques des sols puisque la structure de ces derniers n'a pas été perturbée. Une méthode pertinente de détermination *in situ* de cette courbe est décrite dans la section 2.3.

2.1.3. Direction d'écoulement de l'eau dans le sol

Les mouvements d'eau dans le sol, leur direction et leur importance sont naturellement fonction des différences d'énergie dans le sol. La détermination de la direction des écoulements repose sur l'étude de la forme de la pente des profils de charge totale, déduits des profils tensiométriques (Musy et Soutter, 1991). Ces profils sont représentés sur les **Figure 2-1 ; Figure 2-2 ; et Figure 2-1.**

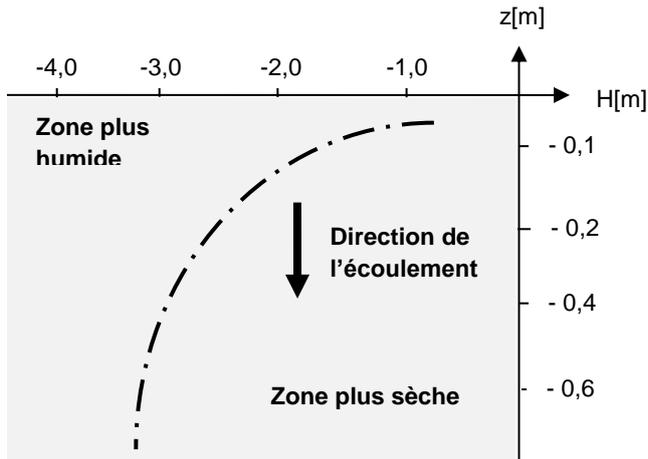


Figure 2-1: Profil de charge totale - écoulement descendant

Source : Adapté de Musy et Soutter (1991)

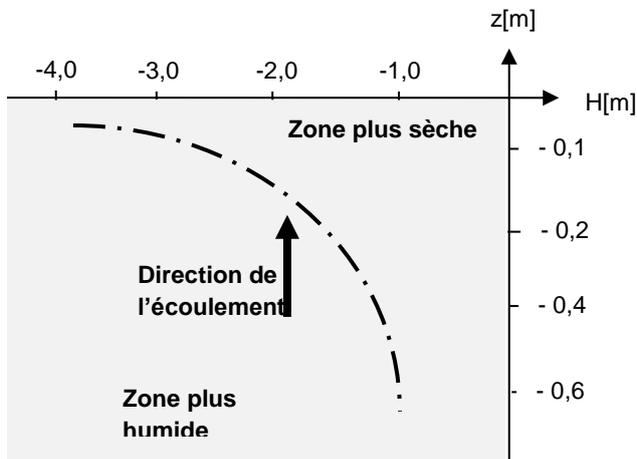


Figure 2-2 : Profil de charge totale - écoulement ascendant

Source : Adapté de Musy et Soutter (1991)

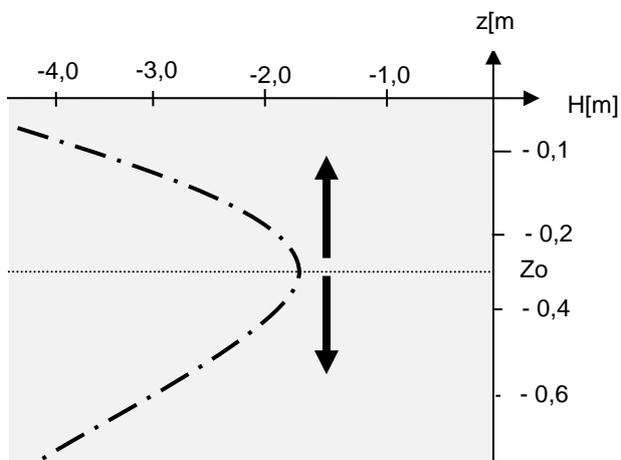


Figure 2-3: Profil de charge totale - Redistribution

Source : Adapté de Musy et Soutter (1991)

Ainsi, sur la base de l'équation de Darcy (2-1), un gradient négatif indique un drainage des eaux (**Figure 2-1**) ; un gradient positif stipule un mouvement ascendant de l'eau (**Figure 2-2**) et un gradient de charge nul traduit un flux nul (redistribution et évaporation) comme illustré à la **Figure 2-3**.

2.1.4. Bilan hydrique

Le bilan hydrique selon Hillel (1974) et Soltner (1989) vise principalement à déterminer en production agricole les échanges entre l'atmosphère et le système sol-végétation dans le but notamment d'évaluer les fluctuations des réserves d'eau disponible pour les plantes. Autrement dit, il s'agit donc de comparer les apports (pluie, irrigation) et les pertes (drainage, évapotranspiration réelle) en eau et renseigne sur la quantité d'eau disponible pour les cultures dans un sol pendant une période donnée. Le ruissellement est aussi un terme du bilan hydrique et peut être considéré comme un apport ou une perte selon le cas.

L'étude du bilan hydrique dépend de nombreux facteurs tels que le sol, le climat, la culture, le système d'irrigation et la pratique de l'agriculteur. La mesure de l'efficacité de l'irrigation à l'échelle d'une parcelle est très délicate voire impossible (Clemmens, 2002 ; Mailhol, 2003). Le drainage par exemple sous culture irriguée, est difficilement envisageable en dehors de l'utilisation de cases lysimétriques. L'estimation du drainage sous la zone racinaire nécessite la mise en place de tensiomètres, de tubes d'accès neutronique ou d'autres équipements équivalents pour la mesure du stock hydrique et bien souvent la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du sol au niveau de la zone racinaire.

2.2. Modélisation numérique des transferts d'eau

Les modèles de simulation étaient et restent de nos jours un moyen puissant de spatialisation des études d'écoulement en milieu poreux et les processus de transport de solutés. La collaboration entre plusieurs groupes de scientifiques de divers pays a permis le développement durant les trois dernières décennies d'un nombre important de modèles numériques et analytiques pour l'analyse des flux d'eau et des processus de transport de soluté dans les sols et les eaux souterraines. Les modèles de simulation numérique permettent de reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes qui se produisent dans le milieu poreux. D'après Diaw (1996), deux approches sont classiquement utilisées pour les écoulements souterrains. Il s'agit de la méthode des différences finies et de celle des éléments finis conformes. Parmi les nombreux modèles utilisant l'approche numérique (**annexe 1**), il faut noter HYDRUS, un code de calcul qui fait référence dans la simulation jusqu'à trois dimensions de l'écoulement de l'eau dans un sol saturé ou non (Crevoisier, 2005 ; Šimůnek *et al.*, 2012 ; Šimůnek *et al.*, 2013). D'autres codes numériques semblables à HYDRUS comme SWMS (Šimůnek *et al.*, 1995), CHAIN-2D (Šimůnek et van Genuchten,

1994) permettent d'obtenir des résultats probants mais n'ont été développés que sous DOS, un système de langage de commandes assez contraignant contrairement à HYDRUS développé aussi bien sous DOS que sous Windows, un système d'exploitation très convivial (Šimůnek *et al.*, 2008b). En outre, la version 2D/3D de HYDRUS avec son interface graphique incorpore en plus des fonctionnalités intrinsèques toutes les performances de la plupart des codes numériques le précédant comme le montre si bien l'**annexe 1**. Ainsi, dans la suite de ce document, seul le code HYDRUS a été décrit sommairement puisqu'il représente le modèle de simulation utilisé pour optimiser le scénario d'irrigation de complément et d'étudier la contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement à la recharge de la nappe sous-jacente.

2.2.1. Caractéristiques générales du modèle HYDRUS-2D/3D

HYDRUS-2D/3D (Šimůnek *et al.*, 2012) fonctionne sur la base de l'équation de Richards pour caractériser à divers pas de temps les propriétés hydrauliques d'un système poreux de dimensions métriques donné. Sous ce modèle mécaniste, le sol, subdivisé en plusieurs couches homogènes et isotropes est considéré comme un milieu poreux, rigide et incompressible dans lequel est négligé le comportement de la phase gazeuse.

Le modèle est subdivisé en plusieurs modules pouvant être combinés : écoulement d'eau, transport de solutés, transport de chaleur et prélèvement racinaire d'eau. Dans le cadre de cette étude, les modules gouvernant les flux d'eau et le prélèvement racinaire d'eau ou la transpiration ont été utilisés. Le nombre de couches du profil de sol, l'épaisseur des compartiments de chaque couche, la période et le temps de simulation sont les paramètres nécessaires pour tourner les modules retenus sous HYDRUS.

Une description détaillée du modèle se trouve dans le manuel technique de Šimůnek *et al.* (2006, 2012).

2.2.2. Etapes de la simulation numérique sous HYDRUS

D'après Crevoisier (2005) et Šimůnek *et al.* (2012) la simulation numérique sous HYDRUS passe en amont par les étapes suivantes :

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

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

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

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

2.2.2.1. Equation gouvernant les flux d'eau

Sur la base des éléments finis de Galerkin (Newman, 1975), HYDRUS résout l'équation (2-6) de Richards sous sa forme mixte et fournit en sortie de chaque nœud du maillage les valeurs de la charge de pression, de teneur en eau volumique et les composantes verticales et horizontales du vecteur vitesse.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(h) \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz} \right) \right] - S \quad (2-6)$$

où θ [$L^3.L^{-3}$], est la teneur en eau volumique, h [L] est la charge de pression, t [T] est le temps, x_i [L] ($i = 1$ et 2) représente le vecteur spatial, $K(h)$ [$L.T^{-1}$] est la fonction de conductivité hydraulique, S [T^{-1}] est l'extraction racinaire, K_{ij} [-] représente les composantes de la conductivité hydraulique du tenseur anisotropique.

Pour un écoulement plan en coupe verticale ($x_1 = x$, coordonnée horizontale et $x_2 = z$, coordonnée verticale) dans un sol supposé isotrope, le tenseur hydraulique est diagonal et $K_{xx} = K_{zz} = 1$.

La discrétisation spatiale et temporelle s'effectue par maillage obtenu grâce à un programme générateur de maillage incorporé au logiciel.

L'équation (2-6) considère uniquement les flux d'eau dans la phase liquide du sol tout en négligeant les effets de la phase gazeuse dans le bilan d'eau. Or lorsque le sol est relativement sec, la phase gazeuse peut avoir un effet non négligeable sur les flux d'eau surtout en zone aride et semi-aride. Cependant, cette influence peut être ignorée lorsque son utilisation se focalise sur la saison pluvieuse.

Dans le cas où les paramètres nécessaires à la détermination des courbes caractéristiques du sol ne sont pas connus, HYDRUS-2D/3D est capable de réaliser la résolution inverse des propriétés hydrodynamiques du sol tout en complexifiant les paramètres de transfert. Pour ce faire, HYDRUS utilise l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963) pour optimiser la fonction objectif permettant la détermination des paramètres hydrauliques du sol. Cependant, Šimůnek et Nimmo (2005) recommandent de réaliser plusieurs résolutions inverses avec différents paramètres initiaux afin de choisir les valeurs des paramètres qui minimisent la fonction objectif dont les détails sur celle-ci se trouve dans les travaux de Šimůnek *et al.*(1998).

La résolution de l'équation (2-6) nécessite la définition au préalable des conditions initiales et aux frontières de la zone d'écoulement.

2.2.2.2. Conditions initiales et aux limites

HYDRUS propose deux choix pour la définition des conditions initiales : soit sur la charge de pression, soit sur la teneur en eau ou la concentration. La condition initiale sur la charge de pression est régie sur l'ensemble du domaine de la simulation par le profil de charge de pression initiale $h_i(z)$. Elle est définie par:

$$h(z, 0) = h_i(z) \text{ avec } 0 \leq z \leq L \quad (2-7)$$

L est la limite inférieure du domaine de simulation.

Les conditions aux limites pour chaque point du domaine de la simulation doivent être spécifiées.

Deux conditions aux frontières de la zone d'écoulement peuvent être définies sous HYDRUS :

- ✚ une condition de charge imposée (condition de type Dirichlet) à la limite supérieure ($h_0 = h(0, t)$) et à la limite inférieure ($h_L = h(L, t)$). Au vue de cette condition, l'utilisateur peut choisir entre pression d'eau constante et pression d'eau variable.

- ✚ une condition de flux imposé (condition de type Neumann) à la limite supérieure (q_0) et à la limite inférieure (q_L) traduite respectivement par :

$$q_0(t) = \left(-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right)_{z=0} \quad (2-8)$$

$$q_L(t) = \left(-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right)_{z=L} \quad (2-9)$$

Egalement à ce niveau, une condition de flux nul, de flux constant non nul ou de flux variable peut être choisie par l'utilisateur.

Lorsque chaque nœud de la frontière est considéré comme surface de suintement le code affecte une pression nulle à tous les nœuds de la zone saturée et une condition de flux nul aux nœuds de la zone non saturée.

Le choix d'une condition aux limites (CL) dépend de la dynamique de l'eau à la surface du sol dont les flux sont régis par les conditions atmosphériques (pluie, irrigation, évaporation, etc.). Ainsi, en absence de submersion à la surface, les CL sont des conditions de flux sous les deux conditions suivantes :

$$\left(-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right)_{z=0} \leq E \quad (2-10)$$

$$\text{et } h_{\min} \leq h \leq 0 \quad (2-11)$$

où E est le taux d'évaporation potentielle [LT^{-1}], h_{\min} est la charge minimale de h [L] imposée à la surface qui peut être fixée arbitrairement à une valeur très basse par l'utilisateur ou estimée via la loi de Kelvin :

$$h_{\min} = \frac{RT}{M_w g} \ln H_r \quad (2-12)$$

où R [$ML^2T^{-2}mol^{-1}K^{-1}$] est la constante universelle des gaz ($=8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$) ; T [K] est la température absolue ; M_w [M] est la masse molaire de l'eau ($=0,018015 kg.mol^{-1}$) ; H_r [-] est l'humidité relative de l'air à la surface du sol et g [LT^{-2}] est l'accélération gravitationnelle ($=9,81 m.s^{-2}$).

Dans le cas où $h \geq 0$ à la surface ou pour un sol très sec après une évaporation prolongée, la condition limite spécifiée à la surface du sol est une condition de charge.

2.2.2.3. Le module hydrodynamique

La caractérisation hydrodynamique du sol sous HYDRUS-2D/3D est basée sur des modèles non linéaires (Brooks et Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Vogel et Císlerová, 1988; Kosugi, 1996; Durner, 1994) dont les plus importantes sont les modèles de Brooks et Corey (1964) et de van Genuchten (1980) associé au modèle statistique de distribution de la taille des pores de Mualem (1976). Ces deux modèles permettent le paramétrage des courbes de rétention hydrique et de conductivité hydraulique du sol en présence.

❖ **Modèle de Brooks et Corey**

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^n & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases} \quad (2-13)$$

et

$$K(h) = K_s S_e^{2/(n+2)} \quad (2-14)$$

avec :

- α , l'inverse de la pression d'entrée d'air [L^{-1}] ;
- K_s , la conductivité hydraulique à saturation [$L.T^{-1}$] ;
- n , l'indice de distribution de la taille des pores [-] ;
- l , paramètre de connectivité des pores [-] ;
- S_e , la saturation relative d'une matrice poreuse définit par : $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ [-], $0 \leq S_e \leq 1$, où
- θ_r est la teneur en eau volumique résiduelle [$L^3.L^{-3}$] et θ_s la teneur en eau volumique à saturation [$L^3.L^{-3}$].

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

Modèle de van Genuchten - Mualem

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (2-15)$$

et

$$K(h) = K_s S_e^1 \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2-16)$$

où m représente un coefficient empirique dans la condition de Mualem (1976) défini par:

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

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

2.2.2.4. Le module de transpiration végétale

La transpiration végétale représentée dans l'équation (2-6) par S est modélisée sous HYDRUS comme un paramètre puits de l'équation de conservation de masse. Elle peut être définie comme étant le volume d'eau extraite par les racines de la plante par unité de volume de sol et par unité de temps. L'extraction racinaire est calculée en utilisant l'approche macroscopique introduite par Feddes *et al.* (1978). Dans cette approche le prélèvement racinaire local sans compensation s'exprime par (Feddes *et al.*, 1978; van Genuchten, 1987; Skaggs *et al.*, 2006; Šimůnek et Hopmans, 2009) :

$$S(h) = \beta(h).S_p \quad (2-17)$$

où $S_p[T^{-1}]$ est le taux potentiel d'extraction racinaire. Ce terme représente le prélèvement d'eau racinaire lorsque la plante n'est pas en condition de stress hydrique ;

$\beta(h) \in [0; 1]$ représente la fonction de réponse au stress hydrique [-] dont la variation est illustrée à la **Figure 2-4**.

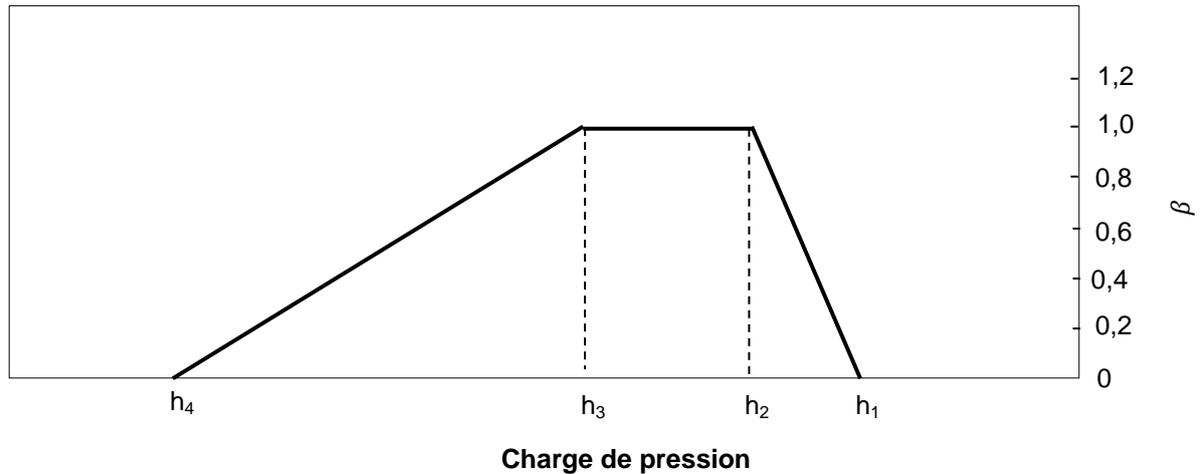
Ce graphique montre que l'extraction racinaire est quasiment nulle proche de la saturation (au-delà de h_1) et en-deçà du point de flétrissement permanent (h_4) alors qu'elle est une fonction croissante (respectivement décroissante) de l'augmentation de la pression entre h_1 et h_2 (respectivement entre h_3 et h_4). Le prélèvement est optimal entre h_2 et h_3 .

Il faut noter que l'équation (2-17) n'inclut pas l'effet de la pression osmotique dû à la présence des ions dissouts dans la solution du sol.

Lorsque S_p est supposée être distribuée sur toute la profondeur de la zone racinaire, elle peut être définie par :

$$S_p = \frac{1}{L_R} T_p \quad (2-18)$$

T_p étant la transpiration potentielle [LT^{-1}] et L_R la profondeur d'enracinement actuelle [L].



Note : h_1 est la valeur de la charge de pression en deçà de laquelle l'extraction racinaire commence ; h_2 , celle en deçà de laquelle le prélèvement d'eau par les racines est optimal ; h_3 , valeur de la charge de pression en deçà de laquelle l'extraction cesse d'être optimale ; h_4 , la charge de pression en deçà de laquelle le prélèvement d'eau par les racines cesse totalement.

Figure 2-4 : Forme théorique de la fonction de réponse au stress hydrique

Source : Feddes et al. (1978)

En considérant une distribution non uniforme du taux potentiel de prélèvement racinaire, Vogel (1987) propose une relation de la forme :

$$S_p = b(z).T_p \quad (2-19)$$

Avec $b(z)$ [L^{-1}] la distribution normalisée de prélèvement racinaire qui renseigne sur la variation spatiale de S_p dans la zone racinaire. La normalisation d'une quelconque fonction de distribution des racines $b'(z)$ permet de définir $b(z)$ à travers la relation :

$$b(z) = \frac{b'(z)}{\int_0^{L_R} b'(z) dz} \quad (2-20)$$

de manière à ce que la somme continue de $b(z)$ sur le domaine de l'écoulement soit égale à l'unité.

L'intégration de l'équation (2-19) sur le domaine de l'écoulement et la combinaison du résultat obtenu avec la condition posée sur l'équation (2-20), aboutit à la relation (2-21) permettant de déterminer la transpiration potentielle.

$$T_p = \int_0^{L_R} S_p dz \quad (2-21)$$

La relation (2-21) permet de définir la transpiration réelle T_r [$L.T^{-1}$] via l'équation suivante :

$$T_r = T_p \int_0^{L_R} \beta(h, z). b(z) dz \quad (2-22)$$

Le terme multiplicatif de la transpiration potentielle dans (2-22) représente l'indice de stress hydrique.

L_R peut-être constante ou variable durant la simulation. Cependant, pour les cultures annuelles, la simulation de la croissance racinaire dans le temps est nécessaire. Ainsi, Šimůnek *et al.* (2008a) supposent que la profondeur d'enracinement actuelle est le produit de la profondeur maximale d'enracinement L_m [L] par le coefficient de croissance racinaire $f_r(t)$ [-]. Soit :

$$L_m = L_m f_r(t) \quad (2-23)$$

$$\text{avec } f_r(t) = \frac{L_o}{L_o + (L_m - L_o)e^{-rt}} \quad (2-24)$$

où L_o [L] est la profondeur d'enracinement en début de croissance et r [T^{-1}] est le taux de croissance. Ce dernier peut être calculé en supposant que 50% de la profondeur racinaire sera atteinte à la mi-saison.

Dans HYDRUS, une modélisation de la compensation racinaire est possible. En effet, lorsqu'une partie de la zone racinaire est asséchée, le prélèvement devient plus important dans la zone racinaire en confort hydrique. C'est ce qui fait la spécificité du modèle dans la détermination de la fonction de prélèvement racinaire.

2.2.3. Avantages et limites de la modélisation numérique sous HYDRUS

Nombreux sont les avantages liés à l'utilisation de cette modélisation sous le code HYDRUS. Quelques-uns de ces avantages sont présentés ci-après :

- ✚ La prise en compte d'un nombre très important de phénomènes entrant en jeu dans l'évolution des profils hydriques, chaque terme des équations de transferts pouvant être discrétisé;
- ✚ la prise en compte des caractéristiques quasi intrinsèques du phénomène à étudier, puisque les conditions initiales et aux limites peuvent être considérées variables en espace et en temps;
- ✚ des théorèmes mathématiques permettent de prouver la convergence de la méthode vers la solution exacte du problème et de définir l'erreur de la solution approchée qui permet ainsi d'évaluer la qualité des simulations;
- ✚ un forum de discussion sur le code HYDRUS est disponible et permet aux utilisateurs d'exposer leurs difficultés. Les feedback des utilisateurs permettent aux fournisseurs d'améliorer perpétuellement le modèle. Aussi, des tutoriels en vidéo pour la simulation de phénomènes particuliers sont disponibles sur le site www.pc-progess.com ainsi qu'un nombre important de publications et d'applications qui sont régulièrement mises à jour.

Cependant, ce type de modélisation présente quelques contraintes dont les impacts ne peuvent être négligés.

- ✚ Les formulations mathématiques reposent principalement sur une relation entre pas de temps et pas d'espace. Selon le phénomène simulé, cette relation peut être contraignante et lourde en temps de calcul. Pour la même discrétisation spatiale, simuler une irrigation ou une redistribution ne fera pas intervenir la même discrétisation temporelle. La gestion de pas de temps variables intégrée à HYDRUS n'est pas suffisante pour traiter la différence d'échelle temporelle très importante entre ces deux phénomènes. Il est donc exclu de simuler un cycle cultural complet en une seule simulation. Mais cette contrainte est vite résorbée si le phénomène global est subdivisé en micro-événements.
- ✚ Un grand nombre de phénomènes physiques peut être représenté par ce modèle. Toutefois, leur opérationnalisation est tributaire de la définition d'un jeu de paramètres considérables. Le calage de ces paramètres est un exercice assez laborieux et délicat si des mesures expérimentales sont disponibles. Ainsi, bien que le gain en précision dû à la complexité du modèle soit un avantage, il n'est pas toujours possible d'exploiter celui-ci à son maximum.
- ✚ La nécessité de préciser séparément à l'entrée du modèle la transpiration de la plante et l'évaporation du sol alors que ces deux termes sont couramment combinés dans la détermination de l'évapotranspiration de la culture. Cependant, la méthode « *Dual Crop Coefficient* » mise au point par Allen *et al.* (1998) permet de s'affranchir de cette contrainte.

En somme, il est à noter que la capacité à donner des résultats fiables et précis fait de ce type de modélisation une référence pour la simulation de phénomènes qui ne peuvent pas être représentés par d'autres moyens plus simples. Toutefois, l'utilisateur peut se heurter à sa complexité de mise en œuvre et son besoin important de données initiales et de paramètres. Mais cette contrainte demeure pratiquement la bête noire de toute modélisation qu'elle soit numérique ou analytique.

2.3. Détermination de la courbe de conductivité hydraulique

La caractérisation des propriétés hydrauliques d'un sol est essentielle pour établir un bilan hydrique pertinent à la parcelle. La conductivité hydraulique demeure le paramètre clé pour appréhender les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol. Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer in situ ce paramètre qui dépend de l'état de surface, de l'humidité et de la stratification du sol. Parmi ces méthodes, la méthode dite de l'infiltromètre à succion multidisques (TRIMS) reste la plus intéressante et la plus facile à mettre en œuvre car elle

permet non seulement des mesures de la conductivité hydraulique à saturation mais également à des succions généralement comprises entre 250 et 0 mm de colonne d'eau (Coquet *et al.*, 2000). Le principe est basé sur la mesure du flux d'infiltration axisymétrique de l'eau à travers un disque à membrane en nylon.

2.3.1. Description de l'infiltromètre à disque et fonctionnement

La description et le fonctionnement de l'infiltromètre émanent de la synthèse réalisée par Coquet *et al.* (2000). En effet, l'infiltromètre à disque (**Figure 2-5**) est constitué d'un disque (D) à membrane (M) en nylon séparé du corps de l'appareil pour des raisons de stabilité de ce dernier et d'assurer en permanence le contact hydraulique du disque d'infiltration avec le sol. Un réservoir d'alimentation (RA) gradué en millimètre permet l'alimentation en eau du disque à membrane par l'intermédiaire d'un tube souple (TS) muni d'une vanne (V). Pour permettre à un volume d'eau de passer du RA et de s'infiltrer dans le sol, elle doit être remplacée par un volume d'air identique. Ainsi, un tube de liaison (T) ou capillaire de communication inter-réservoirs et muni d'une pince (P) permet l'entrée de cet air jusqu'à la base D du RA. Ce dernier tube est relié à un vase de Mariotte (VM) permettant de régler la suction du sol ou le potentiel de l'eau au niveau de la surface du sol. Un tube (AB) à la pression atmosphérique assure le transit de l'air à travers le vase de Mariotte. Des bulbes se forment à la base du tube AB qui remontent dans le vase de Mariotte et rejoignent le volume d'air contenu dans ce dernier.

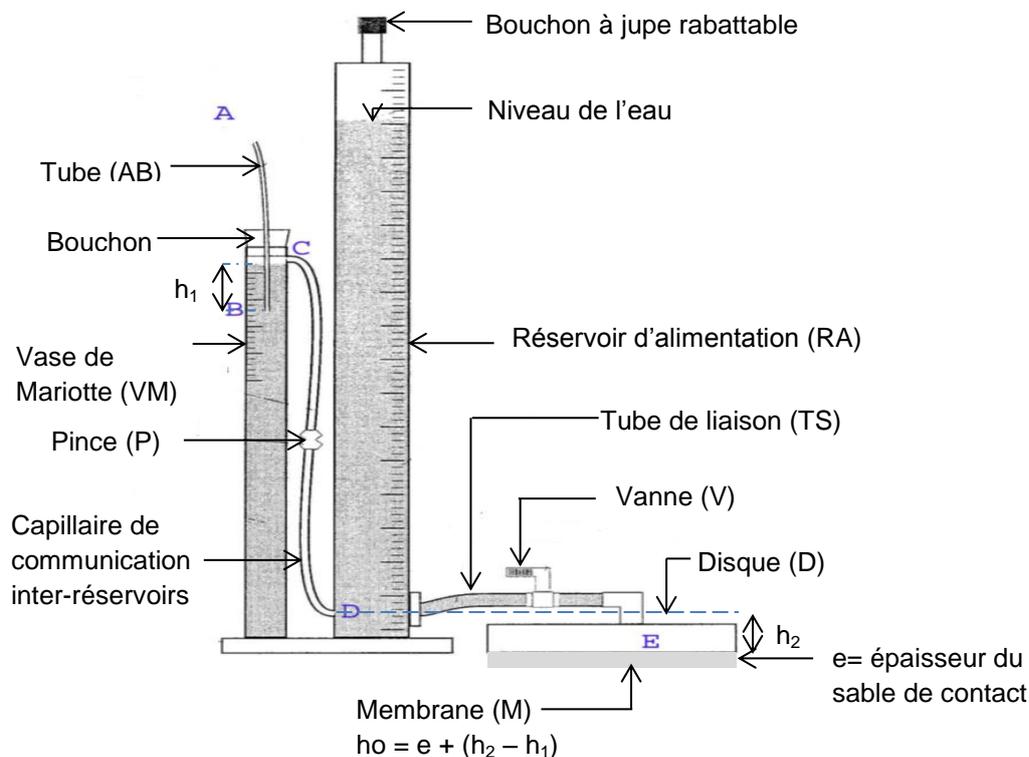


Figure 2-5 : Infiltromètre à disque

Ainsi, la pression de l'eau en C dans le vase de Mariotte est donnée par la formule suivante :

$$P_C = P_A - \rho_w g h_1 \quad (2-25)$$

où P_A [$ML^{-1}T^{-2}$] est égale à la pression atmosphérique, ρ_w [ML^{-3}] est la masse volumique de l'eau, g [LT^{-2}] est l'accélération de la pesanteur et h_1 [L] est la charge hydrostatique.

Si l'effet de la tension superficielle de l'eau dans l'air à la sortie du tube T est négligé, alors l'eau en D est à la pression P_C car $P_C = P_D$. Ainsi, la pression P_o à laquelle l'eau sort du disque de l'infiltromètre est définie par :

$$P_o = P_C + \rho_w g h_2 \quad (2-26)$$

où h_2 [L] est la charge hydrostatique entre D et E.

La combinaison des équations (2-25) et (2-26) donne l'équation (2-27) définie comme suit :

$$P_o = P_A + \rho_w g (h_2 - h_1) \quad (2-27)$$

Cette dernière expression montre l'existence d'une succion h_o à la base de la membrane. Son expression est :

$$h_o = h_2 - h_1 \quad (2-28)$$

Pour que l'eau puisse s'infiltrer dans le sol, il faut que le tube AB soit positionné à la hauteur correspondant à la succion h_o désirée. Dans ce cas, $h_o = 0$ et par suite $h_1 = h_2$ si l'épaisseur e du substrat de contact est négligeable. Ainsi, ce dispositif permet donc de contrôler et de maintenir la pression de l'eau à l'interface infiltromètre/sol.

2.3.2. Quelques modèles de détermination du flux d'infiltration axisymétrique

Concomitamment à la mise au point de l'infiltromètre à disque, la théorie de l'infiltration de l'eau dans le sol s'est développée pour la détermination du flux d'infiltration axisymétrique. Deux méthodes sont utilisées pour appréhender les propriétés hydrauliques du sol. Il s'agit des méthodes en régime quasi-permanent et celles en régime transitoire d'infiltration.

2.3.2.1. Méthodes en régime quasi-permanent

Dans cette méthode de détermination du flux axisymétrique d'infiltration, deux variantes sont considérées. Il s'agit des méthodes multi-potentiels et des méthodes multidisques toutes basées sur le modèle de Wooding (1968).

❖ *Modèle de Wooding*

Pour l'estimation de la conductivité hydraulique à l'aide de l'infiltromètre à disque, Wooding en 1968 a pu proposer un modèle de calcul du flux axisymétrique d'infiltration. L'équation établie en régime permanent à partir d'un disque de rayon r [L] s'écrit :

$$q_{\infty}(h_o) = K(h_o) + \frac{4\Phi(h_o)}{\pi r} \quad (2-29)$$

où $q_{\infty}(h_o)$ [LT^{-1}] est la densité de flux d'infiltration en régime permanent ; $K(h_o)$ [LT^{-1}] est la conductivité hydraulique du sol et $\Phi(h_o)$ [L^2T^{-1}] est le potentiel d'écoulement ou potentiel de Kirchhoff à la succion h_o .

Gardner (1958) a proposé une formule pour le calcul du potentiel d'écoulement. Celle-ci est définie par l'équation (2-30) :

$$\Phi(h_o) = \int_{h_i}^{h_o} K(h)dh \quad (2-30)$$

où h_i [L] et h_o [L] sont respectivement les potentiels initial et final de l'eau dans le sol.

Pullan (1990) a montré que le modèle de Wooding est une solution asymptotique de l'équation de Richards linéarisée appliquée en régime permanent d'infiltration axisymétrique. Ainsi, ce modèle est parfois qualifié de solution en régime « quasi-permanent » (Vandervaere, 1995).

Les conditions d'applicabilité de l'équation de Wooding se résument selon Coquet *et al.* (2000) comme suit:

- i) le sol est semi-infini limité uniquement par sa surface, homogène et isotrope ;
- ii) le potentiel initial h_i est invariable de telle sorte que $K(h_i)$ soit négligeable devant $K(h_o)$;
- iii) la relation $K(h)$ est de type exponentiel (Gardner, 1958) et définit par :

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad (2-31)$$

où K_s [LT^{-1}] est la conductivité hydraulique à saturation et α [L^{-1}] est une constante caractéristique du sol. Elle représente l'importance relative des forces capillaires par rapport aux forces gravitaires.

L'intégration de l'équation (2-30) sous les hypothèses ii (c'est-à-dire $K(h_i) \ll K(h_o)$) et iii) (c'est-à-dire $K(h) = K_s e^{\alpha h}$) donne :

$$\Phi(h_o) = \frac{K(h_o)}{\alpha} \quad (2-32)$$

Il en résulte par combinaison des équations (2-29), (2-31) et (2-32) que la solution de Wooding peut s'écrire :

$$q_{\infty}(h_o) = K_s e^{\alpha h_o} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right) \quad (2-33)$$

❖ *Méthode multi-potentiels*

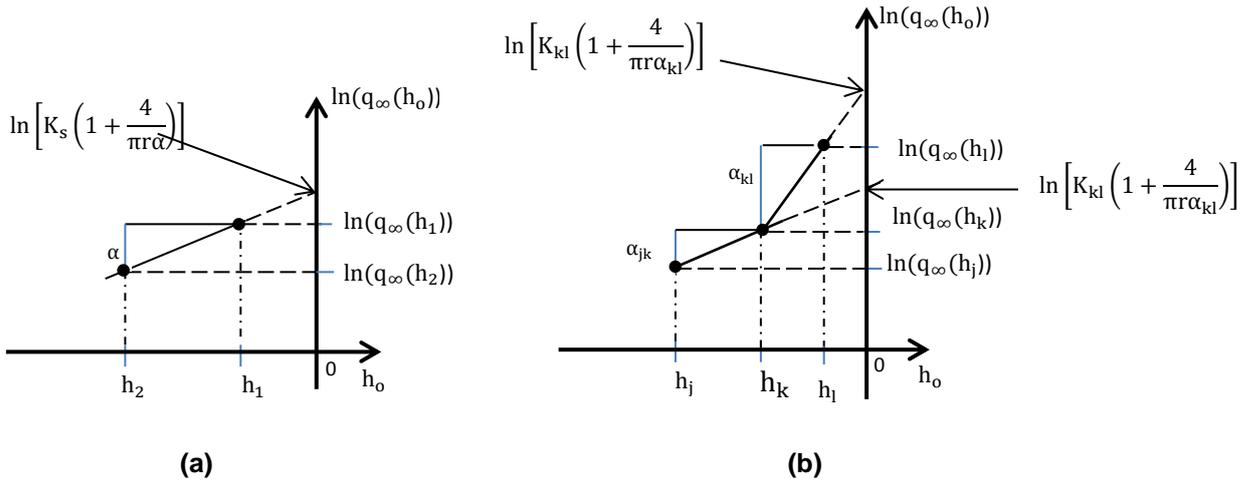
La méthode multi-potentiels est basée sur l'application de différents potentiels à la surface du sol au même point pour un même disque de rayon r . Cette technique prend en compte la variabilité spatiale de l'état de surface (Reynolds et Elrick, 1991) et offre la possibilité de suivre l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la succion appliquée.

La mise en œuvre de cette méthode permet la détermination des paramètres K_s et α de l'équation (2-33). Ainsi, à partir de deux mesures du flux d'infiltration $q_\infty(h_o)$ réalisées au même endroit sous deux succions différentes, les paramètres K_s et α peuvent être déterminés à travers un système d'équations à deux inconnues (Reynolds et Elrick, 1991 ; Ankeny *et al.*, 1991 ; Vandervaere, 2000a ; Vandervaere, 2000b ; Niang *et al.*, 2012). Afin de déterminer aisément les paramètres K_s et α , la relation logarithmique de l'équation (2-33) est préférée à sa forme exponentielle. Dans ce cas (2-33) s'écrit :

$$\ln(q_\infty(h_o)) = \alpha h_o + \ln \left[K_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \right] \quad (2-34)$$

Cette équation qui peut se mettre sous la forme $y = \alpha h_o + b$, avec $y = \ln(q_\infty(h_o))$ et $b = \ln \left[K_s \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \right]$ montre que α représente la pente de la droite passant par les deux couples de points $(h_{o_1}, q_\infty(h_{o_1}))$ et $(h_{o_2}, q_\infty(h_{o_2}))$ alors que K_s se déduit de son ordonnée à l'origine b comme illustrée à la **Figure 2-6**.

Par ailleurs, Logsdon et Jaynes (1993) ont montré que les paramètres K_s et α peuvent être estimés à partir d'une régression linéaire. Pour cela, plus de deux couples de points doivent être mesurés afin d'obtenir une régression significative. Ce qui est généralement onéreux. Cependant, cette méthode se heurte au fait que la linéarité de l'équation (2-34) est rarement vérifiée. Ainsi, pour parer à cette difficulté, Reynolds et Elrick (1991) proposent de considérer la fonction $K(h)$ comme une fonction exponentielle par morceau. C'est ce qui a permis à Ankeny *et al.* (1991) de proposer le calcul d'une conductivité moyenne $\bar{K}(h_k)$ à partir d'une estimation à gauche (α_{jk}, K_{jk}) et à droite (α_{kl}, K_{kl}) des paramètres. Ce qui montre clairement la nécessité d'avoir trois mesures du flux d'infiltration en régime permanent sous des succions croissantes h_j , h_k , et h_l afin d'estimer la conductivité au potentiel h_k (**Figure 2-6**).



(a) Calcul des paramètres K_s et α de l'équation (2-34) à partir de la mesure des flux d'infiltration $q_\infty(h_1)$ et $q_\infty(h_2)$ aux potentiels h_1 et h_2 en régime permanent

(b) Calcul de la conductivité moyenne $\bar{K}(h_k)$ à partir de trois couples de mesures.

Figure 2-6 : Détermination des paramètres K_s et α

❖ Méthode mono-potentiel

Un autre paramètre déterminant les propriétés hydrauliques d'un sol est sa sorptivité définie comme étant la capacité du sol à absorber de l'eau par capillarité en absence de tout effet gravitaire. C'est le paramètre qui gouverne l'infiltration durant la phase initiale. White et Sully (1987) ont proposé une méthode de calcul de la sorptivité du sol pouvant permettre la détermination de la conductivité hydraulique sous une succion donnée via le potentiel d'écoulement. Cette relation est définie comme suit :

$$\Phi(h_f) = \frac{bS^2(\theta_f, \theta_i)}{\theta_f - \theta_i} \quad (2-35)$$

où $S^2(\theta_f, \theta_i)$ [$LT^{-1/2}$] est la sorptivité du sol sous des teneurs en eau volumiques initiale θ_i [L^3L^{-3}] et finale θ_f [L^3L^{-3}]; b [-] est un paramètre caractéristique de la forme des relations de conductivité hydraulique $K(h)$ et de rétention $\theta(h)$. ce dernier est borné théoriquement par $1/2$ et $\pi/4$, soit 0,5 et 0,8 (Coquet *et al.*, 2000) ou tout simplement $b = 0,55$ dans la plupart des cas (Warrick et Broadbridge, 1992).

Ainsi, la solution de Wooding devient par combinaison des équations (2-29) et (2-35) :

$$q_\infty(h_f) = K(h_f) + \frac{4bS^2(\theta_f, \theta_i)}{\pi r(\theta_f - \theta_i)} \quad (2-36)$$

Dans la relation (2-36), la sorptivité se déduit du comportement à l'origine de la cinétique d'infiltration cumulée définie par :

$$I(t) = \int q(t) dt \quad (2-37)$$

Ou plus simplement lorsque t est proche de zéro (Smettem *et al.*, 1995) :

$$I(t) = S(\theta_f, \theta_i)\sqrt{t} \quad (2-38)$$

Cette dernière relation montre que la sorptivité $S(\theta_f, \theta_i)$ représente la pente à l'origine de la cinétique d'infiltration comme le montre la **Figure 2-7**.

La méthode mono-potentielle présente l'avantage d'être facilement reproductible car nécessite une mesure à un seul potentiel et un seul rayon de source. Ainsi, les problèmes de variabilité spatiale du sol sont affranchis. Cependant, elle est sensible à l'estimation de la sorptivité et aux erreurs de mesure des humidités volumiques avant et après l'essai.

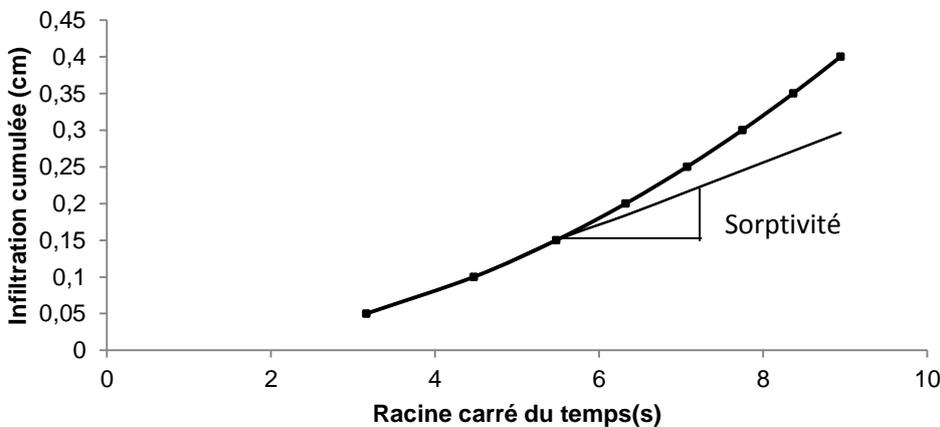


Figure 2-7: Principe d'estimation de la sorptivité

2.3.2.2. Méthodes en régime transitoire d'infiltration

L'inconvénient majeur de la détermination du flux d'infiltration axisymétrique en régime permanent réside dans le fait que les solutions proposées dépendent fortement de la nature des fonctions $K(h)$ et $\theta(h)$. Ainsi, pour s'affranchir de l'équation de Gardner (1958) dans la mise en œuvre de cette méthode, Haverkamp *et al.* (1994) ont développé un modèle de détermination dudit flux en régime transitoire limité à la cinétique d'infiltration précédant l'établissement du régime permanent. L'équation simplifiée se présente comme suit :

$$I(t) = S(\theta_f, \theta_i)\sqrt{t} + At \quad (2-39)$$

Si $K(h_i) \ll K(h_f)$ alors :

$$A = \frac{\gamma S^2(\theta_f, \theta_i)}{r(\theta_f - \theta_i)} + \frac{2-\beta}{3} K(h_o) \quad (2-40)$$

I [L] est la lame infiltrée, γ et β sont des constantes comprises respectivement entre 0,6 et 0,8 puis entre 0 et 1. Le type de sol et le potentiel d'infiltration h_o influent sur la valeur de β . Cette variation de β montre bonnement que la détermination du flux d'infiltration

axisymétrique en régime transitoire ne fournit que des valeurs de la conductivité bornées par K_{\min} pour $\beta = 0$ et K_{\max} pour $\beta = 1$. Dans ce sens, Vandervaere (1995) supposant que $K(h)$ suit une loi de distribution log-normale, propose d'utiliser la valeur médiane $\beta = 0,6$ mais affecté d'une incertitude de $\pm 1,4$. Cette technique présente néanmoins un inconvénient majeur dû aux biais induite par la couche de sable nécessaire pour assurer le contact hydraulique du disque à membrane. Pour pallier cette situation, Vandervaere propose de dériver $I(t)$ par rapport à \sqrt{t} dans la relation (2-39) afin de déterminer la sorptivité $S(\theta_f, \theta_i)$. Cette différentielle qui pourra être ensuite ajustée à une droite se présente comme suit :

$$\frac{\partial I}{\partial \sqrt{t}} = S(\theta_f, \theta_i) + 2A\sqrt{t} \quad (2-41)$$

Ainsi, la phase de décroissance initiale du taux d'infiltration infinitésimale $\frac{\partial I}{\partial \sqrt{t}}$ permet de repérer et d'éliminer facilement l'effet de la couche de sable nécessaire pour réaliser le contact hydraulique infiltromètre-sol.

Conclusion partielle

A travers ce troisième chapitre du présent travail, deux méthodes d'analyse des transferts d'eau dans un sol variablement saturé ont été exposées.

La première méthode a porté sur les modèles à base physique tels que l'équation de Darcy et l'équation de Richards. Une approche de détermination de la courbe de conductivité hydraulique nécessaire pour la résolution de l'équation de Richards a été présentée dans la troisième section de ce chapitre. Cette approche dite de l'infiltromètre à succion multidisques est basée sur l'analyse du flux d'infiltration axisymétrique.

La deuxième méthode concerne la modélisation numérique. Dans ce sens, il a été montré que HYDRUS est un code capable de simuler jusqu'en trois dimensions l'écoulement de l'eau dans un sol variablement saturé. Ce logiciel de simulation utilise l'équation de Richards pour reproduire de façon simplifiée mais satisfaisante la dynamique de l'eau dans le sol, un phénomène si complexe et difficile à appréhender. Cependant, la mise en œuvre des conditions limites atmosphériques sous HYDRUS nécessite la séparation des deux composantes de l'évapotranspiration réelle de la culture. Néanmoins, l'approche « *Dual crop coefficient* » développée par Allen *et al.* (1998) permet de déterminer séparément ces deux composantes que sont : l'évaporation et la transpiration.

CHAPITRE 3 : RESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre expose la caractéristique générale de la zone d'étude qu'est la province du Bam à travers le milieu naturel, la végétation, le climat, l'hydrographie, les caractéristiques agropédologiques et économiques. Les caractéristiques intrinsèques au site expérimental sont abordées dans le **chapitre 4** de ce document.

3.1. Localisation du milieu d'étude et démographie

La province du Bam est située au Centre Nord dans le domaine sahélien du Burkina Faso (**Figure 3-1**). Son choix dans le cadre de cette étude a été motivé par le fait qu'elle se trouve dans la zone de transition entre le Nord sahélien très sec et le Nord soudanien plus ou moins arrosé. De plus, le Bam fait partie des trois provinces productrices du maïs au Sahel Burkinabè. Ce qui peut aisément contribuer à la promotion de cette culture sous irrigation de complément.

Cette province couvre une superficie d'environ 4.084 km² dont 0,3% est occupée par le lac Bam et les retenues d'eau (Semde, 2004 ; INSD, 2009). L'altitude de la zone varie entre 350 et 400 m (Bado et Zongo, 2009).

Cinq provinces se partagent ses frontières :

- ✚ au Nord le Soum ;
- ✚ à l'Ouest le Yatenga ;
- ✚ à l'Est le Sanmatenga ;
- ✚ au Sud le Passoré et l'Oubritenga.

Elle comprend 248 villages répartis dans neuf (09) départements en 2008: Bourzanga, Guibaré, Kongoussi, Nasséré, Rollo, Rouko, Sabcé, Tikaré et Zimtenga. Le chef-lieu de la province est le département de Kongoussi qui a abrité notre site expérimental. Sa population est passée de 162.575 habitants en 1985 à 275.191 habitants en 2006 soit une augmentation de 70% en 20 ans (INSD, 2009). Sous une croissance de 3,1% (Bado et Zongo, 2009), la population estimée en 2015 a été de 371.508 dont 92% de ruraux La province du Bam est caractérisée par une densité de la population estimée à 91%. La province est en majorité occupée par des Mossi et des Peuhls.

3.2. La végétation

La végétation de la province du Bam est de type steppes buissonnante, arbustive/arborée dominée par des épineux (Niang, 2006). Cette végétation est également caractérisée par une strate herbacée dominée par les graminées annuelles. Dans les bas-fonds des forêt-galeries de faible envergure sillonnent par endroits cette steppe. Des boisements assez denses d'acacias se développent également autour de certaines mares sahéliennes. Des

interférences entre les espèces sahéniennes et les espèces soudaniennes ubiquistes sont parfois observées dans cette zone subsahélien.

Les divers types de végétation suivent, dans une certaine mesure, les formes du relief et les unités géomorphologiques, en raison des conditions hydriques qui y règnent. Deux grandes unités végétales sont à distinguer (Niang, 2006):

- ✚ les formations de dunes et d'ensablement où une couverture végétale dense est souvent observée avec un taux de recouvrement pouvant atteindre 90% pendant la saison des pluies;
- ✚ les formations ligneuses avec une densité de 1 à 2 pieds/ha se développant sur les glacis où la végétation est quasiment absente.

Dans l'ensemble, la végétation du Sahel Burkinabè connaît une dégradation croissante du fait de l'anthropisation.

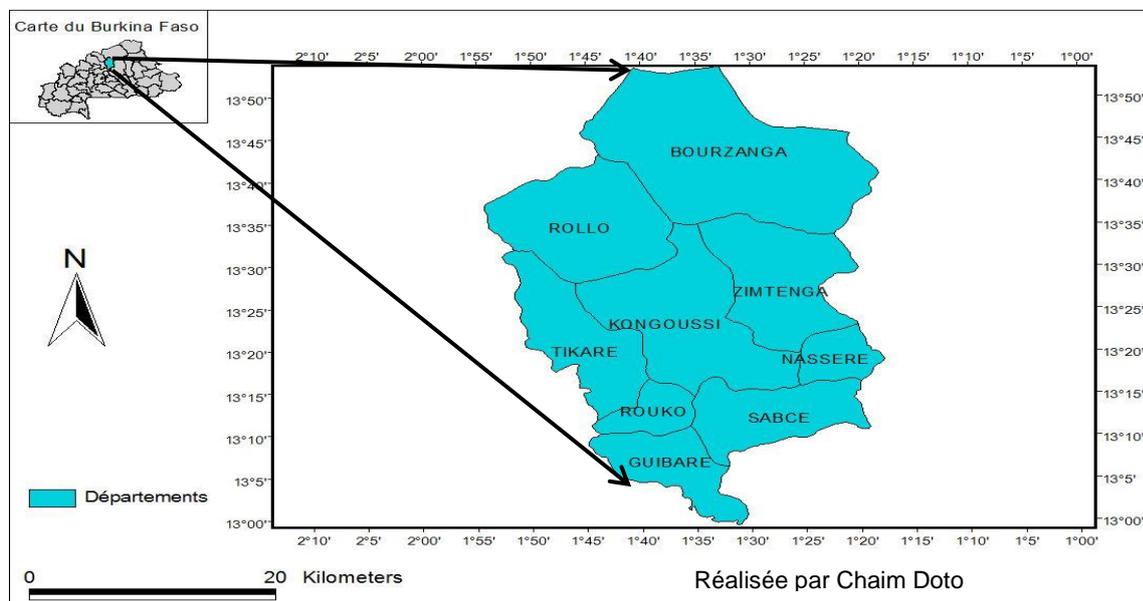


Figure 3-1 : Situation de la province du Bam et du département de Kongoussi

Source: *Institut Géographique du Burkina*

3.3. Contexte climatique et réseau hydrographique

Le Bam appartient à la zone sahénienne du Burkina Faso avec une précipitation annuelle moyenne qui varie entre 400 et 600 mm pour une évapotranspiration maximale de référence de 5 mm.j^{-1} durant l'hivernage et qui peut atteindre 8 mm.j^{-1} vers la fin de la saison sèche (mois de mai). Le régime pluviométrique caractérisé par une importante variabilité des pluies d'une campagne agricole à une autre est nettement différencié : une saison sèche de novembre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre qui passe par son maximum en août avec une moyenne de 195 mm et un écart type de 64 mm. Le nombre de jours pluvieux par campagne varie de 20 à 74 pour un nombre moyen d'environ 50 jours. La **Figure 3-2**

présente le cumul annuel de pluie par campagne agricole (mai-octobre) sur la période 1960-2012.

La **Figure 3-2** témoigne de l'irrégularité des pluies dans la province du Bam car sur 54 campagnes agricoles, plus de la moitié (54%) est déclarée déficitaire. Ce déficit pluviométrique est plus prononcé entre les périodes 1982–1988 et 2006–2011.

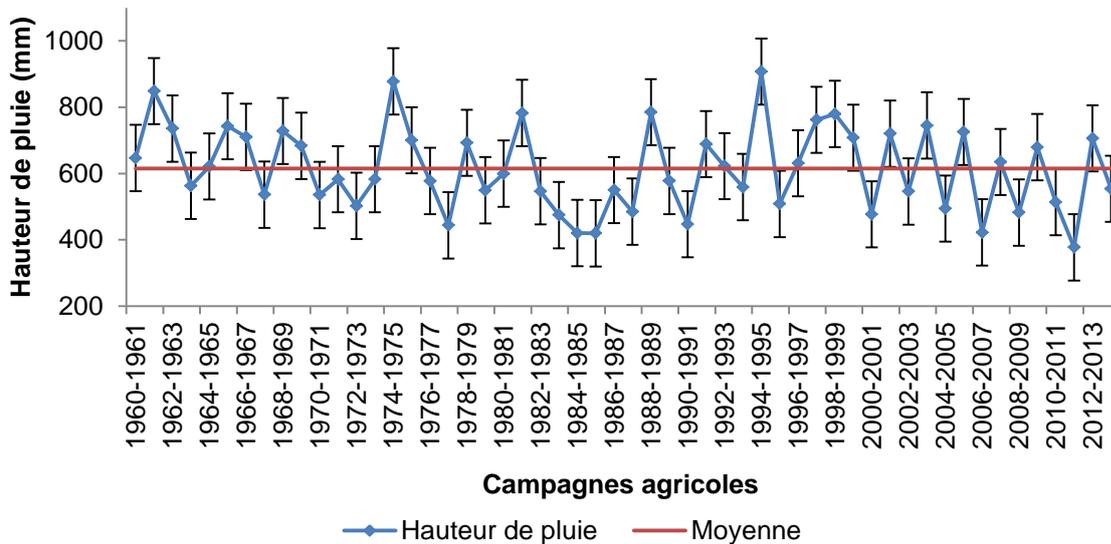


Figure 3-2: Evolution de la pluie par campagne agricole de 1960 à 2013 dans le Bam

Source : *Direction de la météorologie*

Pour confirmer cette tendance à la sécheresse, l'indice normalisé de précipitations (**Figure 3-3**) a été calculé au pas de temps trimestriel par campagne agricole (juillet-août-septembre) compte tenu du caractère essentiellement agricole de la zone. Cet indice à la fois puissant et facile à calculer a été proposé par McKee *et al.* (1993). Utilisé récemment par bon nombre d'auteurs (Bloomfield et Marchant, 2013 ; Dutra *et al.*, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014) en zones semi-arides, cet indice permet de mettre en évidence la nature des conditions d'humidité en cours et peut se révéler plus efficace que celui de Palmer (Palmer, 1965) à réponse lente (OMM, 2012).

Ainsi, l'analyse de la **Figure 3-3** révèle une succession de périodes humide, sèche et normale. Durant 13% du temps, la zone a connu des périodes modérément à très sèches contre seulement 2% du temps pour des périodes extrêmement humides. La sécheresse entamée dans les années 70 s'est accentuée à partir des années 80 et se traduit par un déficit prononcé en 1984. Cette variabilité pluviométrique saisonnière ne permet pas aux cultures céréalières de boucler convenablement leur cycle sans une irrigation d'appoint, en particulier le maïs dont les besoins en eau se situent entre 450 et 800 mm (Doorenbos et Kassam, 1987; du Plessis, 2003). En effet, l'analyse de la **Figure 3-4** montre que la

probabilité pour que ces besoins en eau soient couverts durant la campagne culturale varie de 5% pour les variétés tardives à environ 80% pour les variétés extra précoces.

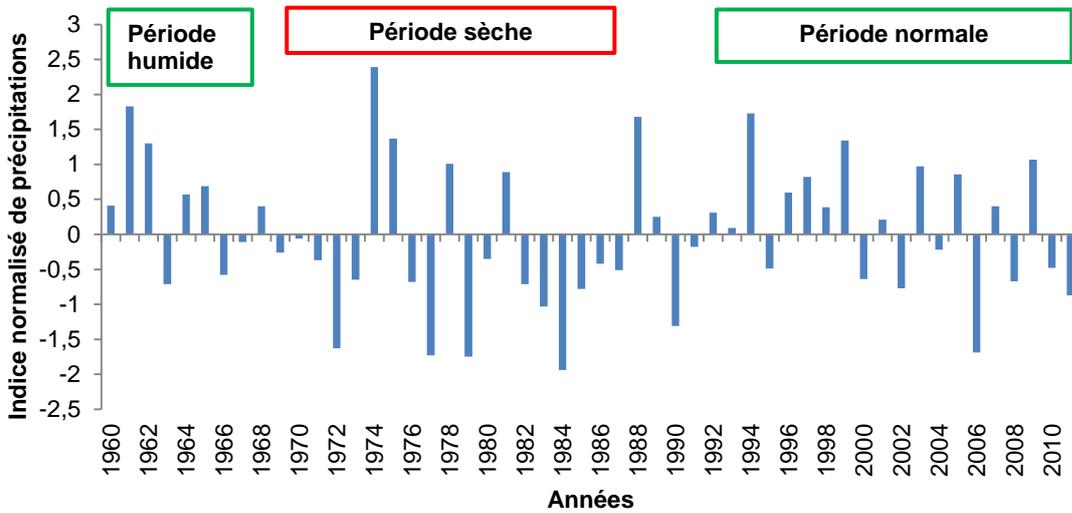


Figure 3-3 : Evolution de l'indice normalisé de précipitations

Source : *Direction de la météorologie*

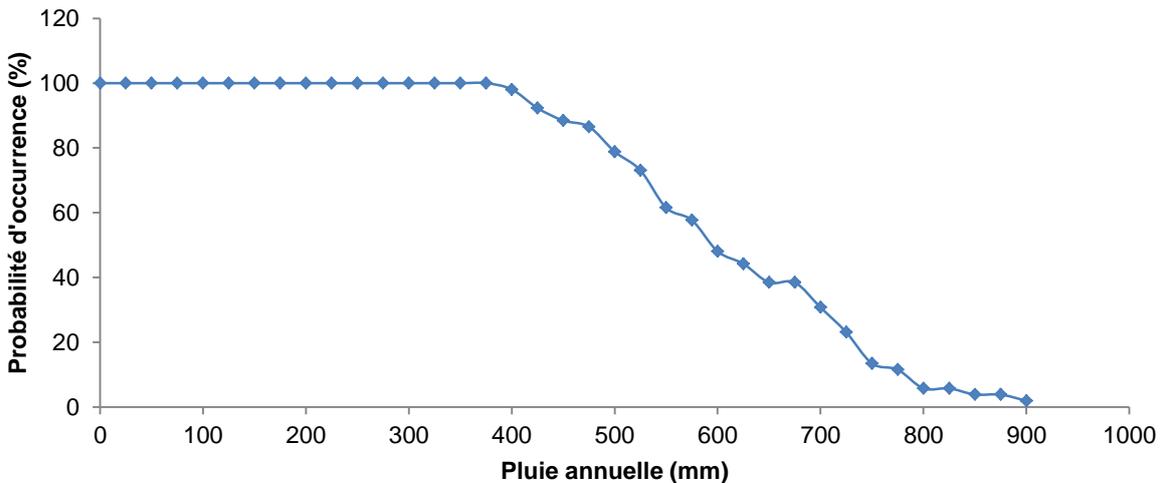
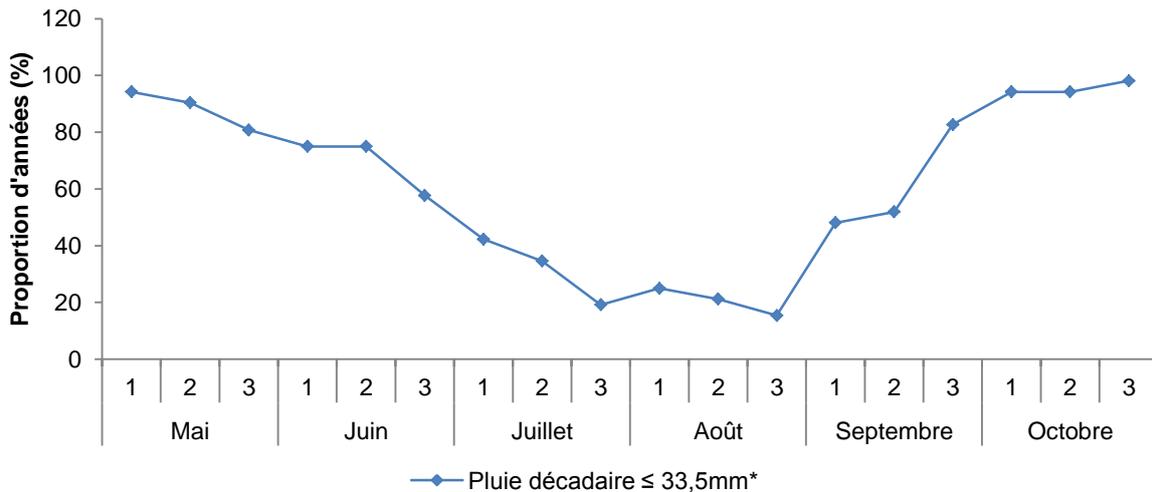


Figure 3-4: Probabilité d'occurrence d'une pluie annuelle donnée de 1960 à 2013

Source: *Direction de la météorologie*

De plus, une analyse décadaire de la série pluviométrique (**Figure 3-5**) révèle que le nombre d'années pour lesquelles la pluie décadaire est inférieure à la moyenne reste élevé au début (mai-juin) et à la fin (septembre-octobre) de la campagne culturale et passe par ses minima au milieu (juillet-août) de la période considérée. Ainsi, les mois de juillet et d'août constituent les mois les plus pluvieux durant lesquels les besoins en eau de la plante peuvent être satisfaits car le risque d'avoir une décade recevant moins de 34 mm de pluie est inférieur à 20%. Une variété à cycle long (> 90 jours) et sensible à la sécheresse comme le maïs a une

chance plus faible de boucler confortablement son cycle. Cela se justifie par le fait que la durée maximale de la période probable pour un stress hydrique fatal est de 82 jours si le semis est réalisé dans la troisième décennie de juin. Au vue de tous ces risques climatiques, l'utilisation de variété à cycle court dans cette zone est l'une des alternatives. Toutefois, cette stratégie ne constitue pas, à elle seule, le meilleur moyen de s'adapter à ce raccourcissement de la campagne culturale. Elle peut se heurter aux sécheresses intra-décennales qui interviennent surtout durant les phases les plus sensibles de la culture.



*moyenne décennale (1960 à 2013)

Figure 3-5: Proportion d'années pour laquelle la pluie décennale est inférieure à la moyenne décennale sur 52 ans

Source: *Direction de la météorologie*

Quant au réseau hydrographique, il est peu dense et essentiellement constitué par un affluent du Nakambé et du lac Bam dont les berges sont le siège d'une activité de production maraîchère (**Figure 3-6**).

En dehors de quelques bas-fonds situés dans le lit du fleuve Nakambé, le réseau hydrographique se limite aux retenues d'eau temporaires constituées essentiellement de boullis. Cette rareté de plans d'eau permanents couplée à l'importance de la dégradation des sols au Sahel Burkinabè limitent considérablement la recharge des nappes souterraines et la pratique de l'irrigation. Aucun barrage hydroagricole n'a été répertorié dans la province du Bam. Le lac Bam est la principale et la plus importante ressource en eau de surface constituant le « poumon » économique de la province. Cependant, son caractère temporaire et la problématique environnementale auquel est confronté aujourd'hui le lac Bam (l'envasement progressif) limitent son impact sur l'activité économique de la zone. Les quelques boullis existant dans la zone sont à vocation pastorale ou ménagère et l'irrigation des cultures pluviales n'est pas une pratique courante dans la zone.

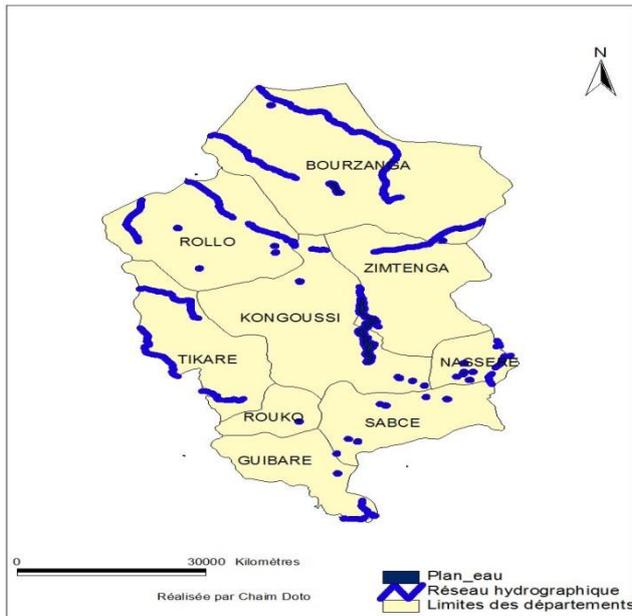


Figure 3-6 : Carte hydrographique de la province du Bam

Source: *Direction de la météorologie*

3.4. Caractéristiques agro-pédologiques

Les principales activités qui occupent les habitants de la province du Bam sont l'agriculture, l'élevage, et récemment l'orpaillage qui draine un nombre important de bras valides au détriment des activités agricoles. Néanmoins, l'agriculture pluviale demeure l'activité la plus pratiquée dont les surfaces cultivées représentent 15% de la surface cultivable (MARHASA, 2014). La céréaliculture (sorgho, mil, maïs) est majoritairement représentée dans les exploitations agricoles et occupe 90% des emblavures. Le maïs occupe en moyenne 3% des superficies emblavées en céréales ces dix dernières années dans la province contre respectivement 80 et 18% pour le sorgho et le mil (MARHASA, 2014). Ces cultures sont pratiquées sur les interfluves et les glacis en pente moyenne et supérieure. L'exploitation des terres varie d'une exploitation agricole à une autre en champs de case bien fumés (proches des concessions), champs de village (cultivés en semi-permanence) et les champs de brousse. Les rendements moyens obtenus sous ces conditions durant les dix dernières années restent faibles et sont respectivement de 839; 764 et 737 kg.ha⁻¹ pour le maïs, le sorgho et le mil. (MARHASA, 2014). Cette province fait généralement partie des provinces caractérisées par un bilan céréalier déficitaire et est classée en deuxième position après le Séno au Sahel Burkinabè (MARHASA, 2014). Ce qui place la province du Bam dans une insécurité alimentaire persistante d'une année à une autre. Des détails sur l'évolution historique des rendements céréaliers sont apportés dans la suite de ce chapitre. Néanmoins, cette organisation du système agraire constitue un important atout pour le développement de la petite irrigation à proximité des habitations.

L'élevage dans le Bam est de type sédentaire et est constitué d'ovins représentant plus de la moitié du cheptel de la province, des bovins et des équins qui interviennent en culture attelée et dans le transport de biens. Les bouses de vaches constituent une importante source de fumure organique pour l'agriculture de case via le compostage.

Les sols de la province du Bam appartiennent à cinq (05) classes (Semde, 2004) réparties entre quinze (15) unités de sols correspondant aux sous/groupes de sols de la Commission de Pédologie et de Classification des sols (CPCS) et dix-neuf (19) unités cartographiques. Les plus importants sont les lithosols sur cuirasse qui sont des sols superficiels, très peu épais, les sols ferrugineux appauvris qui sont assez profonds et présentant une texture sableuse ; ce sont les plus dominants dans la région. Les sols peu évolués sont également rencontrés et ont une texture graveleuse à sableuse et à faible capacité de rétention en eau. Les caractéristiques physico-chimiques moyennes des différentes classes de sols de la province se trouvent au **Tableau 3-1**. Ces valeurs proviennent de 19, 182, 07 et 16 profils issus respectivement des sols brunifiés (classe 1), des sols ferrugineux tropicaux lessivés (classe 2), des sols hydromorphes peu humifères (classe 3) et des sols peu évolués d'apport (classe 4). Les différents profils ont été installés sur tous les types de sol de la province du Bam par le Bureau National des Sols (BUNASOLS) en 1995. La classe 5 représentée par les sols minéraux bruts n'est pas prise en compte dans ce présent travail tout simplement parce qu'elle n'est pas apte à l'agriculture. Le **Tableau 3-1** montre que la plupart des sols du Bam sont pauvres en matières organiques si bien que le degré de limitation de la capacité de rétention et de la disponibilité en éléments nutritifs reste sévère. Les conditions d'enracinement sont difficiles au niveau des sols ferrugineux lessivés indurés et brunifiés respectivement à cause du taux élevé d'éléments grossiers et de la proportion élevée d'argile. La profondeur exploitable par les racines sur l'ensemble des sols du Bam aptes à l'agriculture varie de 20 cm à 140 cm.

Les caractéristiques hydriques des sols du Bam listées au **Tableau 3-1** conditionnent l'évolution locale et spatiale de la réserve utile desdits sols.

La distribution statistique de l'eau utile des sols du Bam est résumée à la **Figure 3-7**. Celle-ci à priori symétrique montre une importante variation de l'eau utile selon l'horizon (surface ou profondeur) non seulement à l'intérieur d'un type de sol (écarts interquartiles et valeurs atypiques) mais également d'un type à un autre. La réserve en eau utile varie de 2% sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés moyennement profonds à 30% sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés à tâches et à concrétions (Semde, 2004).

Tableau 3-1: Caractéristiques physico-chimiques des sols de la province du Bam

Types de sols		Paramètres	Couches		
			0 – 30 cm	30 – 100 cm	
Classe 1 : Sols brunifiés (12,44%)	Constantes hydriques	pF _{2,5} (%)	19,47 (5,47)	27,01 (4,82)	
		pF _{4,2} (%)	8,38 (2,86)	13,79 (3,12)	
		Sable (%)	54,25(13,95)	39,21(12,63)	
	Granulométrie	Limon (%)	22,13 (9,86)	23,55 (9,89)	
		Argile (%)	23,62 (7,94)	37,24 (7,69)	
	Matière organique (%)		0,86 (0,25)	0,59 (0,22)	
Classe 2 : Sols ferrugineux tropicaux lessivés (10,95%)	Constantes hydriques	pF _{2,5} (%)	13,23 (5,77)	18,60 (6,23)	20,01 (5,54)
		pF _{4,2} (%)	5,10 (2,53)	9,35 (3,95)	10,67 (3,64)
		Sable (%)	63,53(15,72)	52,12(17,77)	49,17(16,26)
	Granulométrie	Limon (%)	22,72(12,06)	19,24(10,58)	18,91 (9,71)
		Argile (%)	13,75 (7,44)	28,64(12,05)	31,92(11,19)
	Matière organique (%)		0,97 (0,39)	0,80 (0,28)	0,58 (0,20)
Classe 3 : Sols hydromorphes peu humifères (19,49%)	Constantes hydriques	pF _{2,5} (%)	32,35 (5,94)	31,50 (6,71)	31,73 (6,84)
		pF _{4,2} (%)	17,04 (5,29)	16,80 (5,86)	18,11 (5,04)
		Sable (%)	19,33(12,06)	23,73(12,52)	24,88(14,99)
	Granulométrie	Limon (%)	47,90(11,03)	34,70 (8,77)	24,96(13,28)
		Argile (%)	32,77 (8,82)	41,57(15,76)	50,16(13,05)
	Matière organique (%)		2,12 (0,43)	1,27 (0,46)	0,78 (0,13)
Classe 4 : Sols peu évolués d'apport (57,12%)	Constantes hydriques	pF _{2,5} (%)	15,60 (8,88)	17,12 (8,41)	20,82 (9,67)
		pF _{4,2} (%)	6,27 (3,90)	8,19 (5,15)	11,05 (6,78)
		Sable (%)	55,27(21,78)	52,35(21,21)	46,47(22,80)
	Granulométrie	Limon (%)	29,53(14,91)	25,69(12,23)	23,63 (9,95)
		Argile (%)	15,20(8,02)	21,96(12,72)	29,90(16,03)
	Matière organique (%)		1,03 (0,36)	0,80 (0,29)	0,70 (0,23)

Note : les valeurs entre parenthèses représentent les écart-types standard.

Source : BUNASOLS

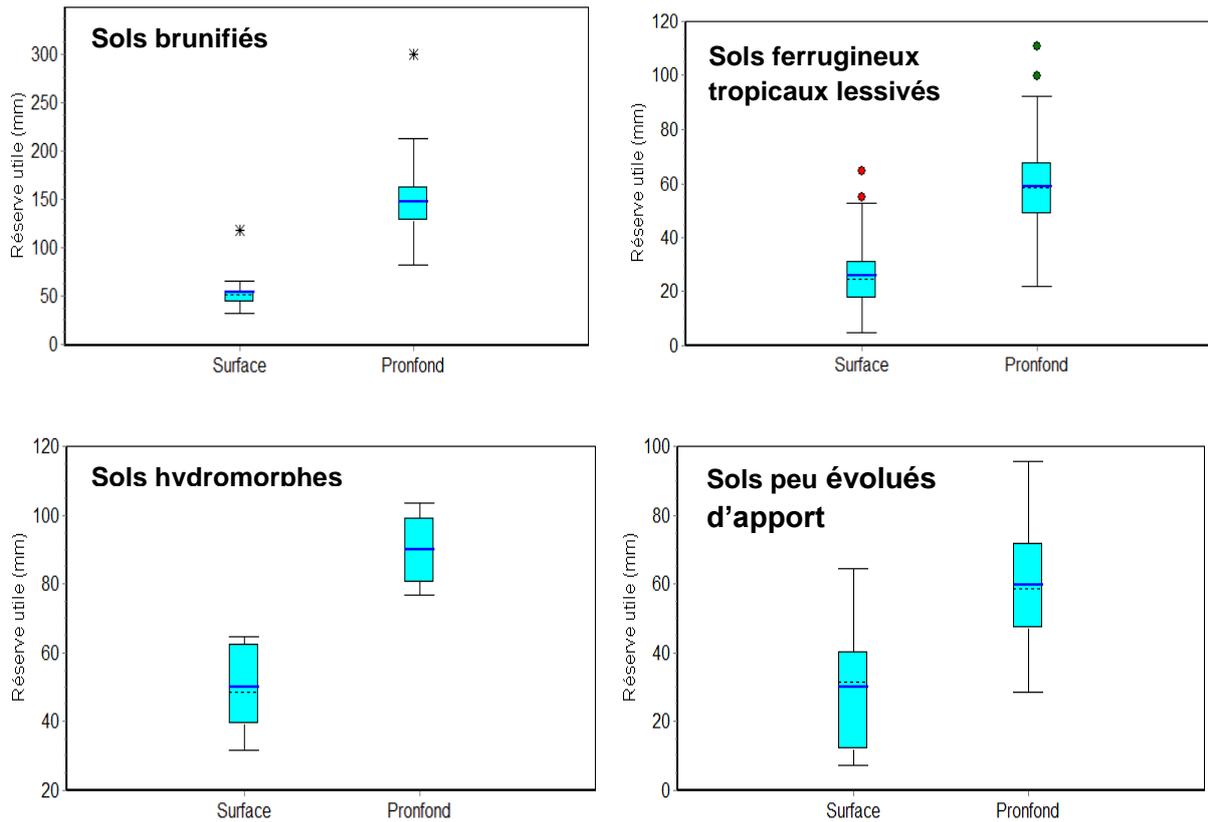


Figure 3-7 : Distribution statistique de la réserve en eau des classes de sols du Bam

Source : *BUNASOLS*

Les exigences des cultures céréalières dans la province du Bam vis-à-vis de la disponibilité en eau varient de 200 mm pour un sol très apte cultivé en maïs à 25 mm pour un sol marginalement apte cultivé en mil.

Cependant, la réserve utile rapportée à l'unité d'épaisseur de sol (**Figure 3-8**) rend bien compte de la différence qui existe entre les propriétés hydrauliques intrinsèques à ces sols et devient par surcroît une grandeur comparable. Ainsi, au vu de la **Figure 3-8**, la disponibilité en eau présente de faibles valeurs et les réserves en eau utile restent faibles pour plusieurs types de sols notamment les sols peu évolués d'apport (colluvio-alluvial modaux), les sols ferrugineux tropicaux lessivés (modaux indurés). Ces diverses analyses montrent que l'ensemble des sols de la province du Bam appartient aux sols de texture moyenne à lourde. Cette situation couplée aux fréquentes poches de sécheresse que connaît la zone témoigne de la nécessité de faire migrer l'agriculture pluviale du Bam vers une agriculture irriguée puisque ce sont les sols ferrugineux tropicaux lessivés qui présentent des valeurs les plus faibles de la réserve utile mais les plus cultivés dans la zone. Or, dans cette province appartenant à la zone sahélienne du Burkina Faso, seule l'irrigation d'appoint à partir d'une source d'eau proche des parcelles constitue la meilleure alternative à cause de l'inexistence d'aménagements ou barrages hydroagricoles et du réseau hydrographique peu dense. Cette

irrigation d'appoint passe forcément par le développement de technologies mobilisant l'eau à l'échelle parcellaire et sa réussite est inhérente aux propriétés hydrauliques du sol via sa capacité de stockage et de restitution d'eau à la plante en période sèche.

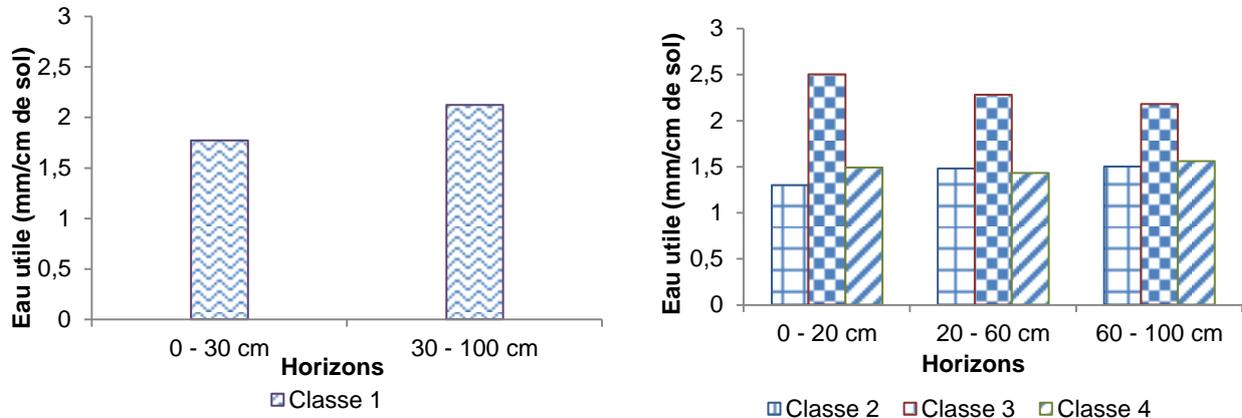


Figure 3-8: Réserve en eau utile moyenne des horizons selon le type de sol

Source : *BUNASOLS*

Ainsi, la mise en place de scénarii d'irrigation d'appoint doit reposer sur le comportement hydraulique de ces sols à l'évolution des poches de sécheresse selon la phénologie de la culture. Ce qui revient alors à caractériser la campagne agricole et de la coupler au temps de redistribution de l'eau dans le sol afin d'isoler le type de séquence sèche couverte. Pour y parvenir une étude statistique des séquences sèches dans la province du Bam s'avère nécessaire. Celle-ci a été développée dans les **chapitres 4** et **5**. Cette étude a permis d'analyser les périodes d'occurrence de plus longues séquences sèches durant le cycle de développement de la culture afin de caller la période favorable au semis du maïs.

3.5. Caractéristiques agro-économiques

La densité élevée de la population (68 habitants/km²) représente en plus des conditions agropédoclimatiques précaires, une entrave au développement soutenu du Bam. Ce qui la place parmi les provinces à forte proportion de population en dessous du seuil de pauvreté. Néanmoins pour résorber le déficit alimentaire auquel est confrontée cette province, la population mène plusieurs activités économiques dont les principales sont : l'agriculture, le petit élevage, le commerce et l'orpaillage qui occupe de plus en plus les bras valides. L'agriculture est essentiellement pluviale et majoritairement dominée par la céréaliculture représentée par le sorgho et le mil. Le maïs quant à lui est peu cultivé malgré son caractère plus productif dans les assolements céréaliers burkinabè (**Figure 3-9**). Il est cependant cultivé sur les petites surfaces irriguées au bord du lac Bam où est également pratiqué le maraîchage.

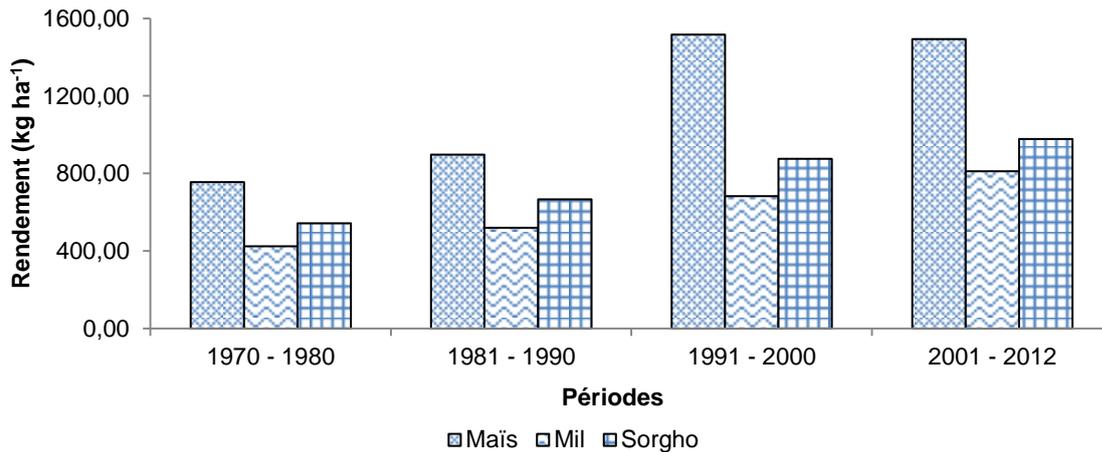


Figure 3-9: Evolution décennale des rendements des céréales sèches au Burkina Faso

Source : FAO (2014)

Compte tenu de l'état dégradé des sols du Bam à l'instar de ceux du Sahel Burkinabè, l'agriculture est généralement pratiquée sous des techniques de conservation des eaux et des sols telles que le *zai*, la demi-lune et les cordons pierreux (**Figure 3-10**) afin d'atténuer les effets de déficit hydrique temporaire observé durant la saison de culture.



Zai

Cordon pierreux

Demi-lunes

Figure 3-10 : Techniques de conservation des eaux et des sols

Source : Zougmone et al. (1999)

Conclusion partielle

Ce chapitre a montré que la province du Bam, située dans le domaine sahélien présente des caractéristiques agroclimatiques et pédologiques défavorables au développement harmonieux des cultures pluviales. La variabilité pluviométrique et la dégradation des sols sont quelques-uns des facteurs agroclimatiques clés qui impactent négativement les moyens de subsistance des producteurs du Bam. Avec moins de 600 mm de pluie par an et des sols à faibles réserves utiles, la maïsiculture risque de se confronter à un déficit hydrique à la mi-saison. Ainsi, dans cette zone, l'irrigation de complément à partir d'un bassin de rétention d'eau demeure la meilleure alternative. Cependant, une caractéristique statistique de la campagne agricole peut limiter les effets des déficits hydriques sur la production agricole dans la province du Bam et améliorer l'efficacité des stratégies d'irrigation d'appoint.

CHAPITRE 4 : MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre détaille l'approche méthodologique adoptée pour atteindre les objectifs de cette étude. Cette approche a été subdivisée en trois phases : phase pré-expérimentale, phase expérimentale et phase post-expérimentale. La phase pré-expérimentale a présenté la méthode utilisée pour établir des scénarii d'irrigation de complément sur la base de l'étude statistique de la campagne agricole. Quant à la phase expérimentale elle a abordé la mise en œuvre de ces scénarii à travers un plan d'expérience. L'approche méthodologique adoptée pour l'optimisation du scénario d'irrigation de complément a été présentée dans la phase post-expérimentale (ou modélisation).

4.1. Description du BCER d'étude

Dans le cadre de la mise en œuvre du projet « irrigation de complément et information climatique », quinze (15) bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER) ont été construits au Sahel Burkinabè dans quinze exploitations agricoles familiales. L'excavation, le talutage et l'imperméabilisation des bassins ont été réalisés à travers un travail communautaire à l'aide de matériels peu coûteux et facile d'accès (pioches, pelles, brouettes et barres à mine). Toutes ces étapes ont été mises en œuvre sous les orientations de l'équipe en charge de la mise en œuvre du projet. L'approche utilisée est le « food for work ». Autrement dit, chaque exploitation agricole a bénéficié de vivres et de matériel d'excavation pour la réalisation des BCER à travers un travail communautaire. Deux types de BCER de capacité variant entre 200 et 300 m³ ont été réalisés. Il s'agit des BCER imperméabilisés avec de matériels locaux (argile, moellons) et ceux imperméabilisés avec la bâche ou film plastique. C'est dans la première catégorie que se trouve le BCER d'étude dont une vue schématique et les caractéristiques se trouvent à la **Figure 4-1**.

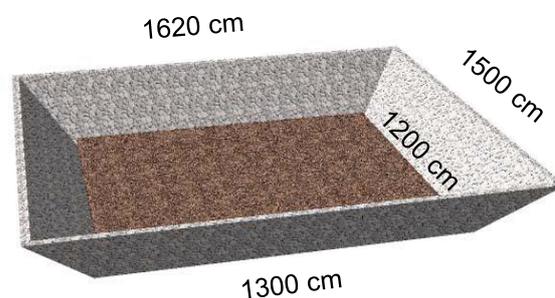


Figure 4-1 : Dimension du bassin de collecte des eaux de ruissellement étudié

Source : *Chaim Doto*

Le talus adopté était de 1/1 pour une profondeur de 160 cm. Les parois du BCER étaient maçonnées et le fond imperméabilisé à l'argile. Un système de dérivation des eaux de

ruissellement a été réalisé et est composé d'une entrée d'eau tapissée de moellons et une diguette en courbe de niveau situé juste en aval du BCER.

4.2. Description du matériel végétal utilisé

Le matériel végétal sur lequel a porté la présente étude était le maïs (*Zea mays* (L.)). La variété cultivée était le *Barka* qui signifie en langue locale moré « merci ». C'est une variété extra-précoce de 80 jours, résistante à la sécheresse et pouvant produire jusqu'à 5,5 t.ha⁻¹ dans les conditions hydriques et agronomiques optimales (Sanou, 2007). Pour la préparation du champ, il est nécessaire après labour et hersage d'épandre 10 t.ha⁻¹ de compost. La densité de semis recommandé est de 83250 plantes à l'hectare. Le désherbage peut se faire soit par application d'herbicides ou soit par sarclage de préférence au 15^{ème} et 25^{ème} jour après semis (JAS). Un démariage à deux plantes par poquet doit être effectué entre le 8^{ème} et le 12^{ème} JAS. Pour la fertilisation minérale du *Barka*, des périodes ont été proposées et résumées dans le **Tableau 4-1**. L'engrais doit être localisé dans un petit trou à 10 cm des poquets, le long de la ligne de semis. Il est nécessaire de faire un buttage après la fertilisation minérale.

Tableau 4-1 : Dose et période d'application d'engrais sous le *Barka*

Engrais	Base	Période d'application	Quantité
NPK	14-23-14	Du semis au 12 ^{ème} JAS	200 kg.ha ⁻¹
KCl ou K₂SO₄	0-0-60	Du semis au 12 ^{ème} JAS	50 kg.ha ⁻¹
Urée 1	46-0-0	25 ^{ème} JAS	100 kg.ha ⁻¹
Urée 2	46-0-0	35 ^{ème} JAS	50 kg.ha ⁻¹

Source : Sanou (2007)

Le maïs a été retenu au détriment des autres céréales sèches telles que le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le mil (*Pennisetum glaucum*) couramment cultivées dans la zone d'étude à cause de sa grande sensibilité au stress hydrique et de son aptitude à mieux valoriser l'eau. Du point de vue exigences agro-écologiques, les conditions de base (sol à texture moyenne et acide) pour la production du maïs dans la province du Bam sont remplies hormis le problème de stress hydrique qui pourrait se poser. De plus, en termes d'exportations, le maïs est la première céréale sèche exportée par le pays bien qu'elle soit la troisième culture derrière le mil et le sorgho (Guissou *et al.*, 2012). En outre, les études réalisées par Fox et Rockström (2003) au Sahel Burkinabè ont déjà montré l'effet positif de la pratique de l'irrigation d'appoint via l'eau des boullis sur le rendement en grain du sorgho et du mil. Il serait alors intéressant d'élargir la connaissance scientifique de la céréaliculture au Sahel Burkinabè. Ainsi, la promotion de la maïsiculture peut constituer un gain financier pour les producteurs sahéliens.

4.3. Détermination des dates de début et de fin de saison agricole

La méthode de Sivakumar (Stern *et al.*, 2006) caractérisée par son caractère agronomique et sa simplicité de mise en œuvre et adaptée à la zone sahélienne a été retenue dans ce présent travail pour la détermination des paramètres agroclimatiques suscités.

4.3.1. Enoncé des critères de Sivakumar et adaptation à la zone d'étude

Dans la définition de Sivakumar le début de saison correspond à la date (d_1) pour laquelle une quantité de 20 mm de pluie est enregistrée en 3 jours consécutifs après le 1^{er} mai sans période sèche supérieure à 9 jours dans un intervalle de 30 jours. Cette définition exige trois paramètres importants: la quantité de pluie, le nombre de jours pluvieux et le seuil de pluie permettant de déterminer les périodes sèches. Ce seuil qui n'est pas pris en compte dans cette définition demeure le paramètre le plus important mais le plus difficile à déterminer. Ainsi, sur la base des caractéristiques hydriques des sols du Bam et de l'évapotranspiration maximale journalière de la zone d'étude durant la période de culture évaluée à 4,5 mm (1960-2012), le seuil de 5 mm a été retenu pour la discrétisation de la campagne agricole.

La fin de saison correspond à la date (d_2) pour laquelle il n'y a plus de pluie pendant deux décades après le 1^{er} septembre. Cette définition comporte en elle une insuffisance car la notion de décade sans pluie peut être nuancée. Une décade sans pluie peut correspondre à dix jours consécutifs pour lesquels la quantité de pluie enregistrée est nulle ou non. Cette dernière considération exige la définition d'un seuil de pluie décadaire qui peut avoir un sens météorologique ou agronomique. Ainsi, la définition initiale a été modifiée et adaptée aux conditions agroclimatiques de notre zone d'étude. Elle s'énonce comme suit : « la fin de saison correspond à la première date (d_2) après le 1^{er} septembre pour laquelle un tarissement d'au moins 80% de l'eau du sol est observé ».

La longueur de la saison est obtenue par différence de d_1 à d_2 . Soit:

$$L_{\text{saison}} = d_2 - d_1 \quad (4-1)$$

4.3.2. Procédure

Pour la détermination de ces trois paramètres, le logiciel INSTAT+ version 3.37 (Stern *et al.*, 2006; Sarr *et al.*, 2011) a été utilisé. Ce logiciel permettant la détermination des risques d'apparition d'événements particuliers ou non sur la base des données journalières est bien adapté selon Sivakumar *et al.* (1993) au calcul des événements climatiques complexes. D'après Sarr *et al.* (2012), ce logiciel climatique prend en compte aussi bien les besoins en eau de la culture pendant les périodes de pointe que le déficit et l'excès d'eau. Son point faible est qu'il n'est pas adapté aux zones subhumides et humides. Des détails peuvent être trouvés dans le guide climatique de Stern *et al.* (2006).

L'étude statistique de l'évolution du climat et en particulier de la variabilité spatio-temporelle de la pluie et de la sécheresse nécessite des séries d'observations non seulement assez longues mais également de bonne qualité. L'acquisition de telles séries chronologiques est un processus parsemé d'embûches durant lequel de nombreuses erreurs de nature différente pourraient être commises.

Nonobstant ce leitmotiv dans l'analyse statistique des séries chronologiques, l'étude s'est surtout intéressée à l'acquisition de données journalières de la pluie représentative du milieu d'étude et présentant moins de lacunes. Ainsi, les données utilisées proviennent de six postes pluviométriques installés dans la province du Bam et couvrant la période 1960 à 2012. Ce réseau de postes pluviométriques couvre toute la province de Bam et ont été installés dans les départements de Bourzanga, Guibaré, Kongoussi, Rollo, Sabcé et Tikaré situé dans un rayon de 20 km. Concomitamment, les séries d'observations ont été également collectées sur la même période au niveau de la station synoptique de Ouahigouya située dans la même zone agro écologique que le Bam afin de vérifier la cohérence et la fiabilité des mesures. Le taux de lacune maximal à l'échelle journalière sur la série chronologique constitutive était de 6,3%. Ce qui réduit considérablement le nombre de valeurs à combler puisque le seuil à ne pas dépasser dans le choix des stations est de 10% (Romero, 1998). Néanmoins, les quelques données lacunaires ont été comblées par la méthode d'imputation du plus proche voisin (Haziza, 2005) et celle aberrantes ont été détectées et corrigées grâce au test de Grubbs (Hamed et Rao, 2000 ; Planchon, 2005) sous le logiciel R. Une fois les données lacunaires comblées, l'inférence statistique a été appliquée à la série chronologique sous le logiciel Khronostat version 1.01 (Boyer, 2002), développé par l'IRD et utilisé dans bon nombre d'études (Roudier, 2008 ; Hallouz *et al.*, 2013). Les tests utilisés à cet effet après l'établissement du caractère normal de la série chronologique, ont porté sur :

- ✚ Le test sur le rang permettant la vérification du caractère aléatoire de la série ;
- ✚ Les tests de détection de rupture tels que le test de Pettitt, le test de Buishand et la méthode de segmentation de Hubert.

4.4. Etude statistique des séquences sèches

Pour appréhender l'impact des séquences sèches en agriculture pluviale à travers cette étude pré-expérimentale, une typologie des poches de sécheresse durant la saison agricole a été faite sur la base d'une étude statistique des pluies intra-décadaires et inter-décadaire. Le choix porté sur la méthode statistique (Mathlouthi et Lebdi, 2009 et 2015) vient du fait que l'analyse de la pluie doit se faire en termes de probabilité d'occurrence. Cela se justifie par le fait que la décision agricole est un pari au vu des conditions agroclimatiques. Il est alors

primordial d'établir une correspondance entre le risque encouru par le producteur et un modèle de risque climatique facilitant ses prises de décision.

Cette étude statistique a permis non seulement de caler le début de la campagne agricole mais également d'identifier la probabilité d'occurrence d'un type de poche de sécheresse à travers son amplitude durant ladite campagne et son impact potentiel sur le développement du maïs. La méthode utilisée à cet effet est basée sur le processus de la chaîne de Markov (Gabriel et Newman, 1962 ; Arnaud, 1985 ; Thirriot, 1986) appliquée à une campagne agricole puisqu'au Sahel le régime pluviométrique est nettement séparé en saisons sèche et humide et considérer les données d'une année entière ne semble point réaliste. L'analyse des séquences sèches est faite à l'intérieur de chaque décade afin d'identifier les décades les plus sèches durant le cycle cultural et leur occurrence. A celle-ci s'ajoute une analyse inter-décadaire pour appréhender le lien qui existe entre les différentes décades et leur occurrence. La série chronologique considérée a été constituée des pluies journalières sur la période 1960-2012.

4.4.1. Le modèle statistique d'analyse des séquences sèches

L'analyse est basée sur le processus markovien qui s'intéresse aux probabilités conditionnelles à deux états décrivant mieux les persistances à court terme d'un phénomène (la sécheresse par exemple). Cette méthode a été amplement discutée par Arnaud (1985), Stern *et al* (2006). Elle stipule que la prédiction d'un évènement futur sachant le présent, ne dépend pas d'informations supplémentaires issues de son passé lointain pour sa précision mais toutes les informations nécessaires se trouvent dans son état actuel. Or la pluie enregistrée durant une journée pluviométrique donnée n'est qu'un évènement aléatoire dépendant de la probabilité que le jour précédant soit sec ou pluvieux. Le processus de Markov est d'ordre n si la pluie du jour j dépend des $j-1$, $j-2$, et $j-n$ jours passés.

Considérons une série de n variables aléatoires X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) représentant une séquence de n jours et pouvant prendre chacune un état ($d = \text{dry (sec)}$) ou $w = \text{wet (humide)}$). La probabilité $P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ que la séquence $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ se produise dans l'hypothèse qu'elle est constante d'une année à l'autre dans l'utilisation des chaînes de Markov fait intervenir des probabilités conditionnelles. Ainsi, en théorie des probabilités, la loi de multiplication permet d'établir la relation suivante :

$$P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P(x_1) \times P(x_2/x_1) \times P(x_3/x_2, x_1) \times \dots \times P(x_n/x_{n-2}, x_{n-1}) \quad (4-2)$$

où $P(x_1)$ est la probabilité à priori et $P(x_n/x_{n-2}, x_{n-1})$ constituent les probabilités à postériori ou conditionnelles.

Dans le cas d'un processus ne dépendant que de l'état du jour précédant, la relation (4-2) se réduit à :

$$P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P(x_1) \times P(x_2/x_1) \times P(x_3/x_2) \times \dots \times P(x_n/x_{n-1}) \quad (4-3)$$

Cette séquence est connue sous le nom de chaîne de Markov du premier ordre dans laquelle les probabilités à postériori représentent les probabilités de transitions d'un état à un autre. Elle est dite du deuxième ordre si l'état du jour j (d ou w) dépend des états de la veille et de l'avant-veille. Dans ce cas, ce sont les trois termes de l'équation (4-3) qui sont pris en compte dans le calcul de la probabilité d'occurrence d'une séquence donnée.

4.4.2. Application des chaînes de Markov aux pluies décennales

Les chaînes de Markov ont été utilisées ici pour analyser les probabilités d'occurrence des séquences sèches décennales durant la campagne agricole sur la période 1960-2012. Dans cette analyse inter-décennale, une décennie a été considérée comme sèche (dry = d) si la pluie enregistrée était inférieure au seuil de pluie décennale calé à 50 mm. Ce seuil a été déterminé pour le stade de la mi-saison à partir de l'évapotranspiration potentielle maximale journalière (4,5 mm) et du coefficient culturale du maïs $k_c = 1,15$ (Allen *et al.*, 2005). La mi-saison incluant les stades de floraison, fécondation et grossissement des grains représente la phase la plus sensible au stress hydrique (du Plessis, 2003) et justifie son choix pour l'élaboration de scénarii d'adaptation robustes. Dans le cas où la pluie décennale était supérieure au seuil de 50 mm, la décennie a été déclarée comme étant humide (wet = w). Ainsi, la probabilité d'avoir deux décennales sèches encadrées par deux décennales humides sous une condition initiale wd définit comme étant une décennie sèche précédée d'une décennie humide correspond d'après l'équation (4-4) à :

$$\text{dekad}_2 = P(wd, d, w) = P(d/wd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddw} \quad (4-4)$$

Pour trois décennales sèches cette relation devient :

$$\text{dekad}_3 = P(d/wd) \times P(w/dd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddd} \times P_{ddw} \quad (4-5)$$

En généralisant à n décennales sèches nous avons :

$$\text{dekad}_n = P(d/wd) \times \underbrace{P(d/dd) \times \dots \times P(d/dd)}_{n-2 \text{ fois}} \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddd}^{n-2} \times P_{ddw} \quad (4-6)$$

où : P_{wdd} est la probabilité d'avoir deux décennales sèches après une décennie pluvieuse ;

P_{ddd} est la probabilité d'avoir une décennie sèche après deux décennales sèches ;

P_{ddw} est la probabilité d'avoir une décennie pluvieuse après deux décennales sèches.

La chaîne de Markov de premier ordre a été utilisée dans le cadre de cette étude pour analyser l'interaction entre les décennales du point de vue de leur état humide ou sec. Ce choix est dû au fait que dans la mise en œuvre de la modélisation Markovienne, les problèmes d'estimation augmentent avec l'ordre comme l'a déjà montré Afouda (1985).

La détermination des probabilités de transition a été rendue possible grâce au logiciel INSTAT+ capable d'implémenter les chaînes de Markov jusqu'au deuxième ordre.

4.4.3. Analyse de l'impact potentiel des séquences sèches et détermination du niveau de satisfaction des besoins en eau du maïs

Pour appréhender l'impact historique des séquences sèches sur le développement du maïs, une typologie des poches de sécheresse a été faite durant la saison agricole sur la base d'une analyse des pluies intra-décadaires en complément à l'analyse Markovienne. L'analyse intra-décaire des séquences sèches faite sous INSTAT+ a porté sur trois classes de séquence sèche isolées sur la base de leur longueur : > 5 jours ; > 7 jours et > 10 jours. La classe < 5 jours n'a pas été considérée compte tenu de la réserve en eau utile des sols de la zone qui peuvent atténuer les risques de stress hydrique de la culture durant cette période de 5 jours. Le seuil de la pluie journalière était celui calé pour la discrétisation de la campagne agricole (section 5-2-1). La variété de maïs considérée était le *Barka* dont le cycle cultural était de 80 jours. Cette variété améliorée et résistante à la sécheresse fait partie de celles recommandées par Wey (1998) pour les zones à pluviométrie inférieure à 900 mm. Le cycle cultural du *Barka* a été subdivisé en quatre phases : initial, croissance, mi-saison et arrière-saison. Les durées de chaque phase ont été tirées des travaux de Doto *et al.* (2015) et ont été respectivement de 10, 30, 25 et 15 jours. Pour chaque phase, les coefficients culturaux ont été déterminés par décade sur la base des recommandations d'Allen *et al.* (1998). Ces coefficients culturaux ont permis de déterminer les besoins journaliers en eau ET_{c_1} et ET_{c_2} du *Barka* en condition d'eau non limitée (**Tableau 4-2**) correspondant respectivement aux deux valeurs extrêmes de l'évapotranspiration de référence de la zone (5 et 8 mm). Les valeurs de ET_{c_1} et ET_{c_2} ont servi à déterminer la proportion de campagnes agricoles couvrant totalement ces besoins en eau du *Barka* par phase. Les pluies journalières par campagne agricole depuis 1960 jusqu'à 2012 ont été affectées d'un coefficient de 0,8 afin de déterminer les pluies efficaces. Les scénarii de semis ont été réalisés par décade et calés au milieu de chaque décade considérée. A partir de ces dates, le cumul pluviométrique efficace a été calculé sur chaque phase et comparé au besoin en eau total du *Barka* sur ladite phase afin d'identifier un éventuel déficit hydrique.

Tableau 4-2 : Coefficient cultural et évapotranspiration maximale par période

	Initial	Croissance			Mi-saison			Arrière-saison
Durée de la phase (jour)	15		30		25		10	
Durée de la période (jour)	15	25	35	45	55	65	70	80
Kc	0,15	0,48	0,82	1,15	1,15	1,15	1,15	0,48
ET_{c_1} (mm/j)	0,75	2,42	4,08	5,75	5,75	5,75	5,75	2,42
ET_{c_2} (mm/j)	1,20	3,87	6,53	9,20	9,20	9,20	9,20	3,87

Cette double analyse intra et inter-décaire couplée au niveau de satisfaction des besoins en eau du *Barka* a permis non seulement de caler le début de la campagne agricole mais également d'identifier la probabilité d'occurrence d'un type de séquence sèche à travers son

amplitude et son impact potentiel sur le développement harmonieux du maïs afin de mieux établir des scénarii d'adaptation. Ces scénarii d'adaptation à travers l'irrigation de complément ont été mis en œuvre dans la phase expérimentale de cette étude.

4.5. Etude expérimentale de l'irrigation de complément

Cette section décrit la mise en place et la conduite d'essai en milieu réel afin d'étudier la contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement à l'endiguement des poches de sécheresse. La méthodologie adoptée pour la collecte de données hydrauliques et agroclimatiques a été présentée et succinctement justifiée.

4.5.1. Site d'étude et dispositif expérimental

4.5.1.1. Description du site expérimental

L'étude a été réalisée sur deux parcelles situées à 500 m de l'une de l'autre dans le village de Mogodin, département de Kongoussi (**Figure 4-2**). Le site d'étude, situé dans la province du Bam, est une zone cultivée qui, au fil des années et sous l'action des aléas climatiques et de l'anthropisation, connaît une dégradation continue de ses ressources naturelles. L'essai mené sur deux parcelles représentatives de la morphogénèse des zones couramment cultivées dans la province du Bam émane de la difficulté d'instrumentation des parcelles.

Le site jouit d'un climat sahélien, caractérisé par une saison sèche de 8 à 9 mois et une saison humide de 3 à 4 mois. La pluie annuelle est inférieure à 600 mm et les campagnes agricoles comptent 21 à 79 jours de pluie sur la période 1960-2013.

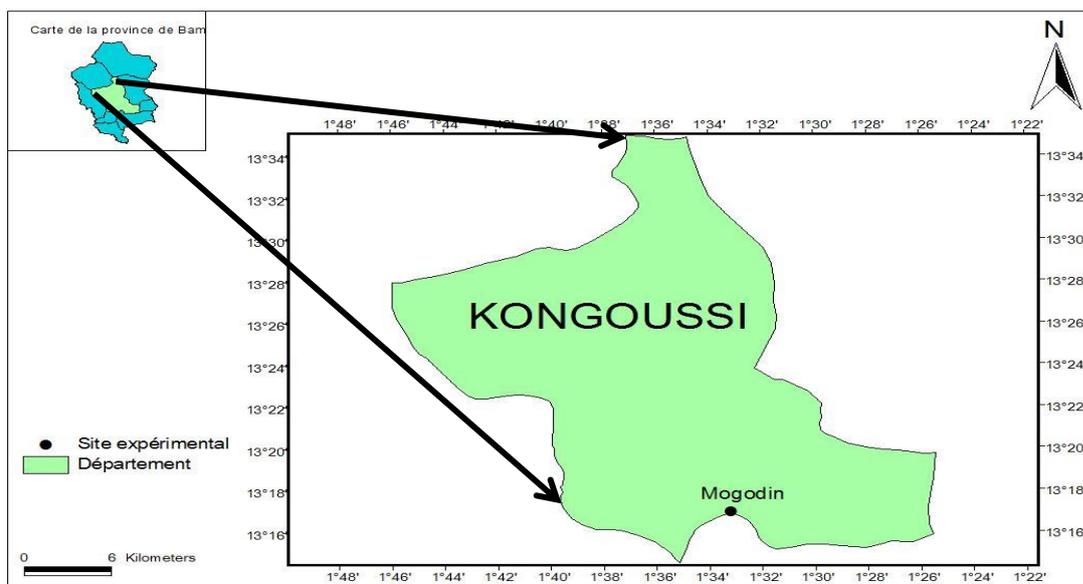


Figure 4-2: Situation du milieu d'étude (Kongoussi) et du site expérimental (Mogodin)

Source : *Institut Géographique du Burkina*

Les sols dominants sont sablo-limoneux, faiblement dotés en matière organique (Pallo *et al.*, 2006). Les principales caractéristiques du sol du site expérimental sont présentées dans le **Tableau 4-3**. Ce sol présente des caractéristiques texturales, de densité et des humidités caractéristiques contrastées entre l'horizon de surface (0-30 cm) limono-sableux et l'horizon sous-jacent, plus épais et limono-argileux ayant une réserve hydrique plus élevée.

Tableau 4-3: Propriétés physico-chimiques du sol du site expérimental

Horizon (cm)	Argile %	Limon %	Sable %	da g cm ⁻³	M.O %	C/N	H _{CC} %	H _{PPF} %	pH	CEC cmole.kg ⁻¹
0-30	10,45	32,2	57,35	1,58	1,02	13	13,72	5,22	6,46	8,58
30-100	34,55	30,73	34,72	1,73	0,80	13	24,49	10,02	6,12	7,5

Note : da = densité apparente ; M.O = matière organique ; H_{CC} et H_{PPF} = respectivement humidité pondérale à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ; C/N = rapport entre le pourcentage de carbone total et celui de l'azote total ; CEC = capacité d'échange cationique.

4.5.1.2. Dispositif expérimental et système d'irrigation

L'expérience a été menée sur une parcelle de 0,2 ha cultivée en maïs (*Zea mays* (L.)). La variété choisie a été la même que celle retenue lors de l'étude statistique de la campagne. En rappel, il s'agit de la variété *Barka* à cycle court (80 jours), résistante à la sécheresse et dont le rendement potentiel est de l'ordre de 5,5 t.ha⁻¹.

Le dispositif expérimental est un bloc de Fisher randomisé avec quatre blocs et quatre traitements (**Figure 4-3**). Les blocs ont été disposés perpendiculairement à la pente.

La description des traitements considérés se présente comme suit:

Traitement 0 (T0) : parcelle témoin conduite en régime pluvial;

Traitement 1 (T1) : apport de 2 irrigations de complément, l'une en début du stade floraison, l'autre en début du stade fécondation;

Traitement 2 (T2) : apport de 2 irrigations de complément, l'une en début du stade floraison, l'autre en début du stade remplissage des grains;

Traitement 3 (T3) : apport de 3 irrigations de complément, la première en début du stade floraison, la seconde en début du stade fécondation et la troisième en début du stade remplissage des grains.

Un stade phénologique est atteint lorsque 50% des individus (c'est-à-dire les plantes) présentent les traits caractéristiques de ladite phase.

Un dispositif tensio-neutronique a été installé sur chaque traitement hydrique en une répétition compte tenu de la disponibilité limitée en cannes tensiométriques et tubes d'accès

neutronique adaptés. Les tubes d'accès neutronique étaient en aluminium ; ce qui réduit considérablement l'absorption de neutrons par rapport au PVC.

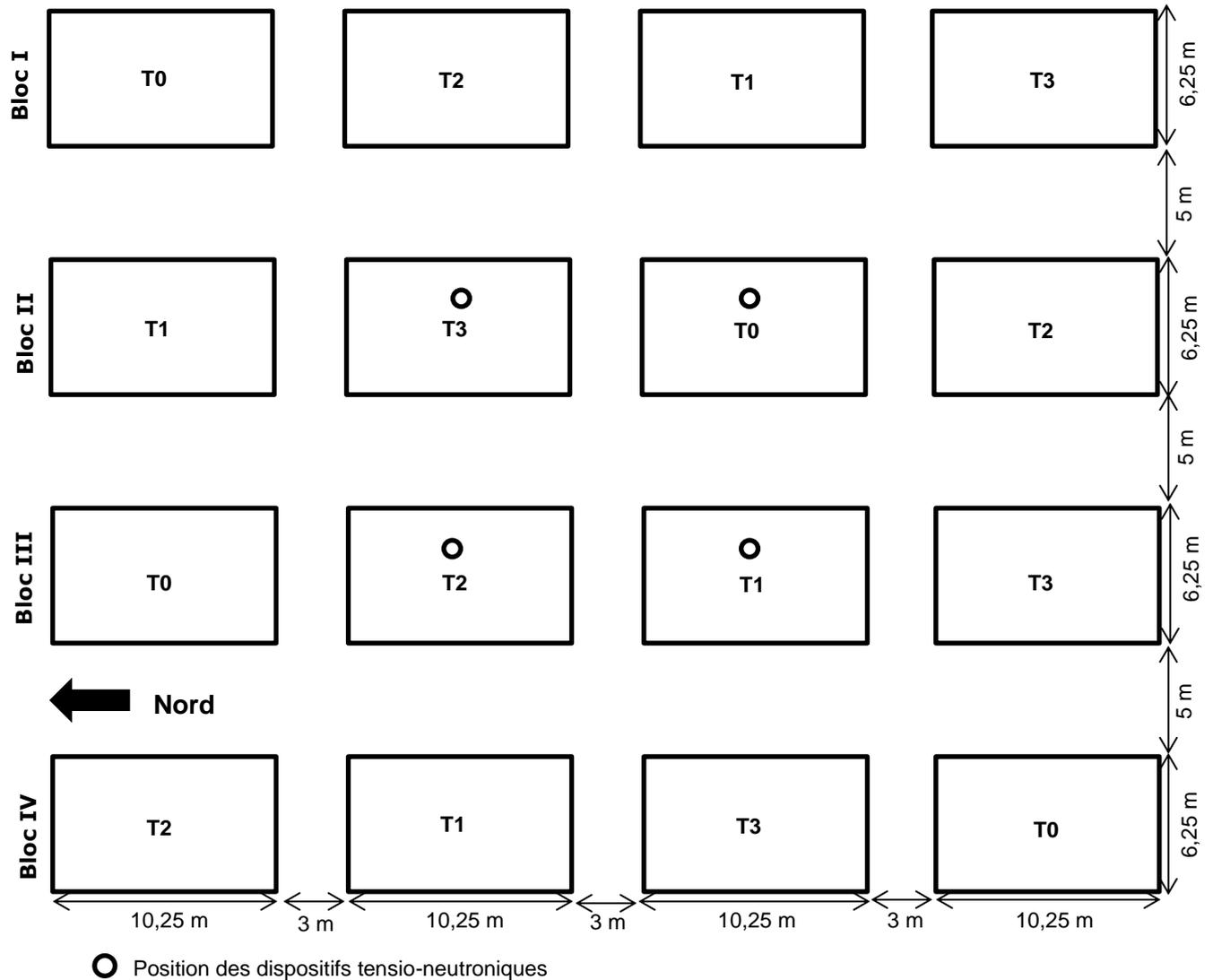


Figure 4-3: Dispositif expérimental montrant les parcelles et les sites de mesure

Les doses d'irrigation de complément ont varié entre 32 et 51 mm selon les années et les périodes d'apport. Le **Tableau 4-4** résume les différents traitements hydriques ou scénarii d'irrigation de complément appliqués.

Tableau 4-4: Doses d'irrigation de complément appliquées par stade de développement

Stades phénologiques	Campagne agricole 2013-2014			Campagne agricole 2014-2015		
	Floraison	Fécondation	Remplissage des grains	Floraison	Fécondation	Remplissage des grains
T0	Aucune irrigation			Aucune irrigation		
T1	51	45		50	46	
T2	51		32	50		45
T3	51	45	32	50	46	45

Ces périodes d'apport ont été retenues pour coïncider avec les phases de grande sensibilité au stress hydrique. Les apports d'eau ont été effectués à partir d'un système d'irrigation gravitaire «semi-californien» constitué d'une tuyauterie principale et quatre tuyauteries secondaires supportant des vannes installées en tête de chaque unité expérimentale ou parcellaire (**Figure 4-4**). Chaque tuyauterie secondaire de diamètre 50 mm, alimente en eau chaque bloc défini dans le dispositif de Fisher. Le moyen d'exhaure utilisé pour les irrigations était une motopompe délivrant 1800 litres par heure et connectée en tête du canal d'amenée ou tuyauterie principale par un tuyau de refoulement. Une pompe à pédale a été également utilisée surtout durant le stade initial du maïs. La technique d'irrigation au niveau parcellaire était l'irrigation à la raie. De petits trous gravillonnés ont été aménagés sous chaque vanne en amont de chaque raie et permettent de casser l'énergie mécanique de l'eau tout en la stockant pour favoriser son écoulement dans les raies. A partir des raies, l'eau a été alternativement drainée dans les sillons grâce à des butées réalisées en aval des sillons. Les vannes ont été positionnées de sorte que l'irrigation de chaque unité expérimentale soit autonome. L'eau d'irrigation provenait du bassin de collecte des eaux de ruissellement situé à 5 m de la parcelle expérimentale et ayant une capacité totale de 283 m³ pour une capacité utile de 150 m³ (**Figure 4-1**). L'analyse chimique de l'eau révèle que ce dernier ne pose pas de problème pour son utilisation puisque le taux d'absorption de sodium (SAR) est égal à 0,05 inférieur au seuil recommandé (Soutter *et al.*, 2007).



Figure 4-4 : Système d'irrigation et vue partielle des parcellaires

4.5.2. Conduite de l'essai et bilan d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère

4.5.2.1. Pratiques culturales et fertilisation

Avant le démarrage de la campagne agricole, le champ expérimental a reçu un apport de 900 kg.ha⁻¹ de fumure organique sous forme de compost avant d'être labouré à la charrue (traction animale) et des billons écartés de 80 cm ont été confectionnés manuellement et perpendiculairement à la grande pente. Le maïs a été semé manuellement le 30 juin, en 2012 et 2013 et le 23 juin en 2014, en poquets pour un maillage de 40 cm x 80 cm.

La fertilisation minérale a consisté en un apport de 200 kg.ha^{-1} de NPK (14-23-14) le 12^{ème} jour après semis (JAS) suivi de 100 kg.ha^{-1} d'urée (46%) le 25^{ème} JAS et 50 kg.ha^{-1} d'urée (46 %) le 35^{ème} JAS. Le démariage à deux plants par poquet a été effectué à la levée. Le sarco-binage et le buttage ont été réalisés à chaque levée des adventices. La récolte a été faite une fois que les grains ont atteint la maturité. Pour l'estimation du rendement grain, des carrés de rendement (1 m^2) ont été installés en trois répétitions sur chaque unité expérimentale à la maturation des grains. Les épis ôtés de leur spathe ont été séchés à l'air libre puis égrainés et pesés à l'aide d'une balance électronique de précision ($0,01\text{g}$).

Un suivi hebdomadaire de la croissance des plantes a été réalisé sur 12 pieds de maïs échantillonnés et étiquetés par unité expérimentale (**Figure 4-5a**) jusqu'au stade de reproduction.

Deux rhizotrons (**Figure 4-5b**) de $50 \times 100 \text{ cm}$ ont été également installés sur chaque groupe de parcelles (témoin pluvial et irrigué) pour le suivi de la dynamique racinaire durant les différents stades du développement du maïs.

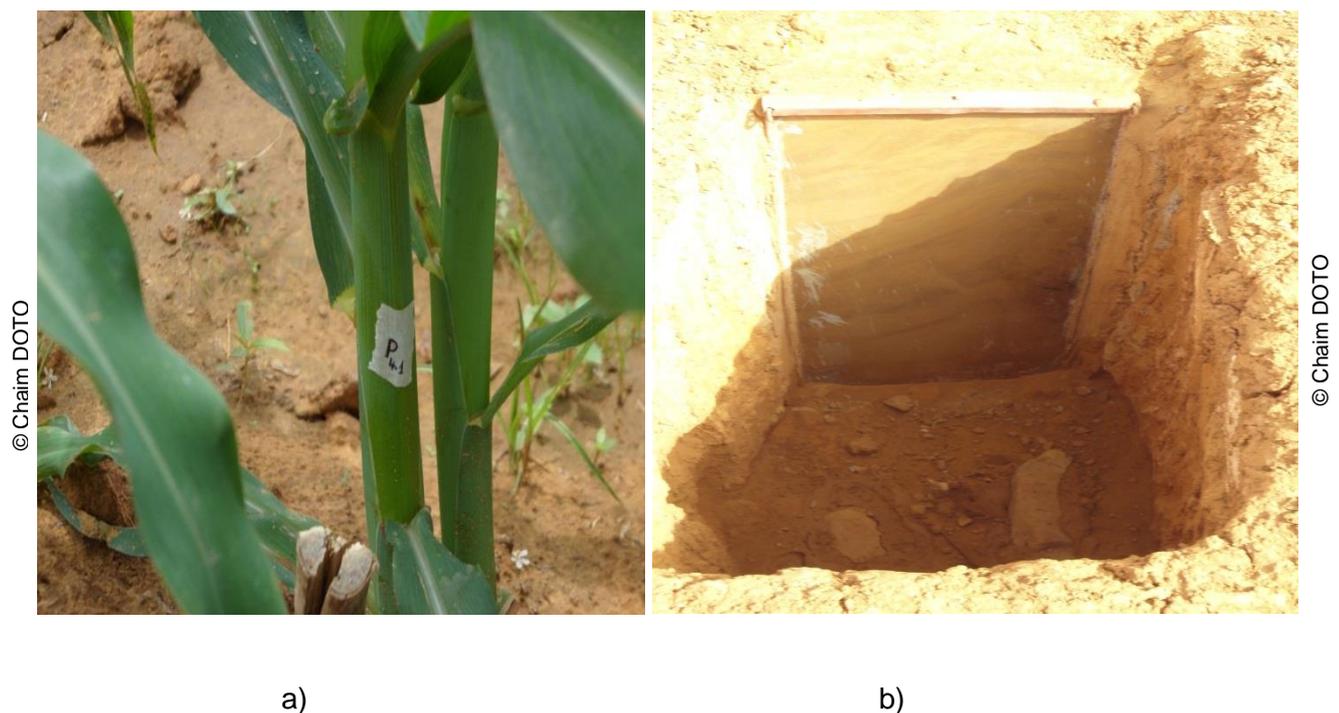


Figure 4-5 : Plante de maïs étiquetée (a) et rhizotron en place (b) pour le suivi respectif de la croissance en hauteur et de la dynamique racinaire

Cette dynamique a été également renforcée par un profil racinaire ponctuel effectué à la maturité du maïs afin de déterminer l'enracinement effectif de la plante et de le confronter aux résultats obtenus sur les rhizotrons. La technique de caractérisation des enracinements a consisté à l'installation de deux profils pédologiques de 40 cm de large et de 100 cm de profondeur chacun perpendiculairement aux rangs et entre 2 pieds consécutifs de maïs. Les

racines ont été rendues visibles en décapant au couteau chaque face du profil sur quelques millimètres d'épaisseur. Un cadre 20 x 40 cm maillé à 5 cm de côté a été placé sur la face pour cartographier le développement racinaire sous chaque pied de maïs échantillonné.

4.5.2.2. Mesure de la teneur en eau du sol et de la pression de charge

Le suivi des variables d'état (teneur en eau et charge de pression) a été réalisé quotidiennement durant les trois campagnes d'essai (2012 ; 2013 et 2014) à heure fixe, c'est-à-dire 7 heures du matin. Chaque unité expérimentale représentant un traitement est équipée d'un tube d'accès neutronique ($\varnothing 50$ mm) et de cinq cannes tensiométriques placées à 15, 30, 50, 70 et 90 cm de profondeur (**Figure 4-6**). Ces cannes tensiométriques permettent de suivre la disponibilité de l'eau pour la plante.

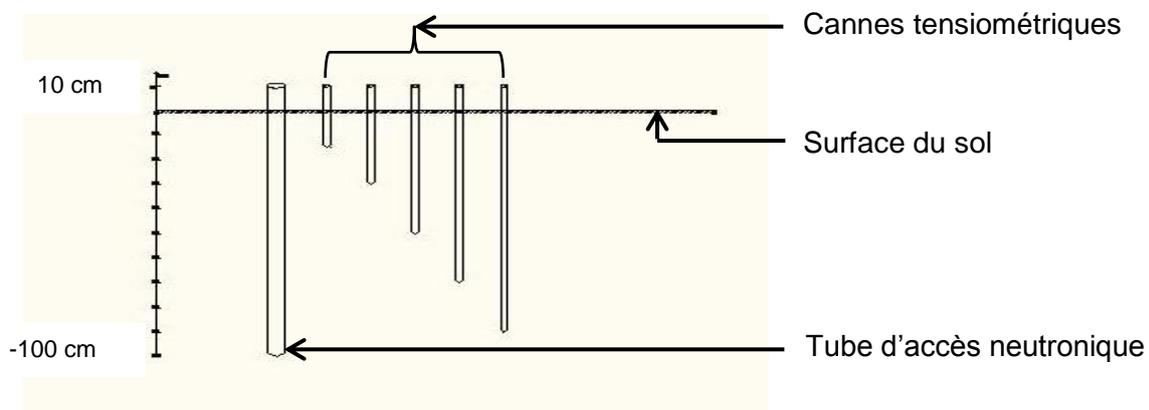


Figure 4-6 : Dispositif tensio-neutronique

Source : *Chaim Doto*

Les mesures de la teneur en eau ont été effectuées tous les 10 cm jusqu'à 100 cm, à l'aide d'un humidimètre neutronique "503DR" (**Figure 4-7a**). Les teneurs en eau volumique ont été obtenues grâce à l'étalonnage de la sonde réalisé durant la campagne expérimentale de 2012. Les mesures de la charge de pression ont été réalisées aux profondeurs de positionnement des cannes tensiométriques au moyen d'un tensiomètre (**Figure 4-7b**). Le tensiomètre est muni d'un capteur de pression à membrane équipé de jauges de contrainte avec indicateur numérique. La mesure s'opère à l'aide d'une aiguille de seringue qu'on introduit dans un volume d'air à travers le bouchon qui recouvre la canne. La valeur qui s'affiche à l'écran est négative, représentative de la dépression observée dans la canne et traduisant ainsi la tension de l'eau dans le sol. Aussi, les tensions élevées caractérisent les sols secs et cela traduit que les plantes à ce niveau sont sous stress hydrique tandis qu'elles sont faibles dans les zones humides. Ces mesures traduisant la disponibilité d'eau dans le profil ont permis de déterminer la charge hydraulique totale H à une profondeur donnée via l'équation (2-2) du **chapitre 2**.

Les cannes tensiométriques installées à la profondeur 15 cm ont été utilisées pour appréhender l'évaporation de l'eau du sol alors que celles positionnées à 30 et 50 cm ont été utilisées pour suivre la disponibilité d'eau dans la zone densément colonisée par les racines. Quant aux cannes positionnées à 70 et 90 cm, elles ont été utilisées pour déterminer le gradient de charge afin d'évaluer le drainage à 80 cm de profondeur.

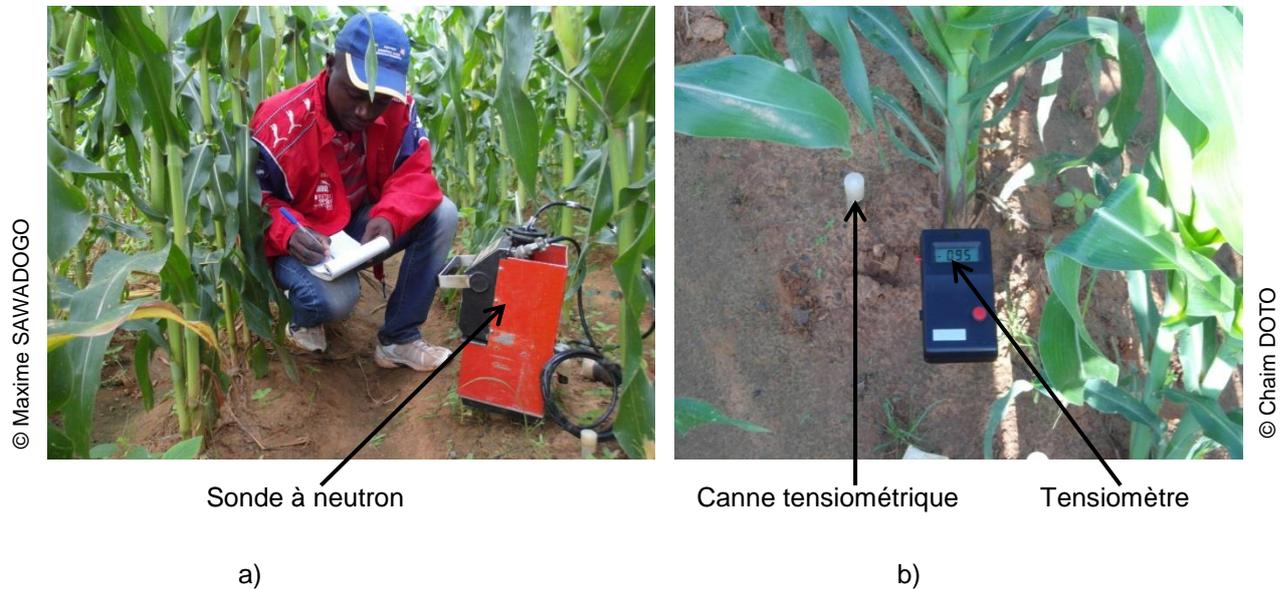


Figure 4-7: Mesure du comptage neutronique (a) et de la pression de charge (b)

❖ Etalonnage de la sonde

Il a consisté à associer pour la même date le comptage réduit effectué à une profondeur donnée, à la teneur en eau volumique déterminée en laboratoire par la méthode gravimétrique sur des prélèvements d'échantillons de sol effectués à la même profondeur à l'aide de la tarière (trois par profondeur afin de déterminer l'échantillon moyen). L'humidité volumique (θ) est dérivée de celle pondérale (H_p) par l'intermédiaire de la densité apparente (d_a) du sol à travers la relation (4-7).

$$\theta = H_p \times d_a \quad (4-7)$$

Les valeurs de l'humidité volumique obtenues aux différentes profondeurs de prélèvement (10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm et 80 cm) ont été respectivement reliées au comptage réduit via les impulsions N de la sonde effectuées à 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm, 35-45 cm, 45-55 cm, 55-65 cm, 65-75 cm, 75-85 et 85-95 cm et du standard N_0 . Au niveau de chaque site de mesure, une relation linéaire a été ajustée aux couples comptage réduit-humidité volumique à travers l'équation (4-8).

$$\theta = \alpha n + \beta \quad (4-8)$$

où : θ est la teneur en eau volumique du sol [$L^3 L^{-3}$] ; n est le comptage réduit [-] défini par :

$$n = \frac{N}{N_0} \quad (4-9)$$

N étant le comptage absolu ou impulsion mesuré directement par la sonde à neutron et N_0 le standard mesuré dans une eau de référence. α et β sont des constantes déterminées via l'ajustement à une droite du nuage de points comptage réduit-teneur en eau.

La courbe d'étalonnage a été établie pour les deux horizons (0-30 cm et 30-100 cm) identifiés lors de l'installation des profils pédologiques et tient compte des couples de points obtenus pour chacun des horizons sus-définis compartimentés en plusieurs couches comme le montre l'**annexe 2**. Les courbes présentées à la **Figure 4-8** et issues de la synthèse de celles en **annexe 2** montrent un ajustement linéaire satisfaisant de la distribution de la teneur en eau en fonction du comptage réduit pour chaque horizon sur la base du coefficient de détermination. Donc cette régression linéaire peut être utilisée comme courbe d'étalonnage de la sonde pour convertir les comptages neutroniques mesurés sur le terrain en teneur en eau volumique.

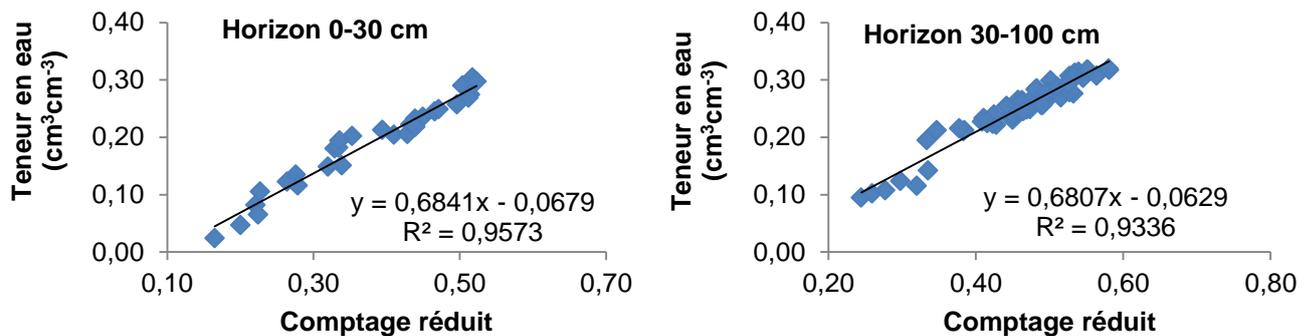


Figure 4-8: Courbes d'étalonnage de la sonde à neutron

La densité apparente da dans l'équation (4-7) a été obtenue par étuvage à 105°C pendant 24 h d'échantillons de sol prélevés au pas de 10 cm sur un profil pédologique à l'aide d'un cylindre de densité. La relation (4-10) a été utilisée pour sa détermination.

$$da = \frac{m_{sol}}{V_{cylindre}} \quad (4-10)$$

où m_{sol} est la masse d'échantillon de sol après étuvage et $V_{cylindre}$ est le volume du cylindre de densité estimé à environ 98,2 cm³ (diamètre = hauteur = 5 cm).

4.5.2.3. Etablissement du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique est l'application du principe de conservation de l'eau contenue dans un volume de sol donné. La méthode utilisée dans cette étude est semblable à celle décrite par Doorenbos et Kassam (1987), Tardieux *et al.* (1990), Sarr *et al.* (1999), Evett (2002), Hong-Yong *et al.* (2006) et qui consiste à évaluer les entrées et sorties d'eau dans le continuum sol-végétation-atmosphère. Le modèle considéré dans le cadre de cette

étude est un modèle capacitif à deux réservoirs : un réservoir de stockage et un réservoir d'alimentation correspondant respectivement à la zone racinaire potentielle et actuelle du maïs (**Figure 4-9**).

La profondeur du réservoir d'alimentation dépend de l'évolution temporelle des racines de la culture (observée sur le rhizotron). Ce réservoir d'alimentation peut se superposer au réservoir de stockage à la mi- saison (floraison). La profondeur du réservoir de stockage est limitée inférieurement par la profondeur maximale d'enracinement du maïs obtenu via les profils racinaires et les rhizotrons. Cet enracinement maximal a été estimé à 80 cm. Ainsi, d'après la **Figure 4-9** l'évolution du stock d'eau journalier dans le réservoir de stockage a été décrite par la relation suivante :

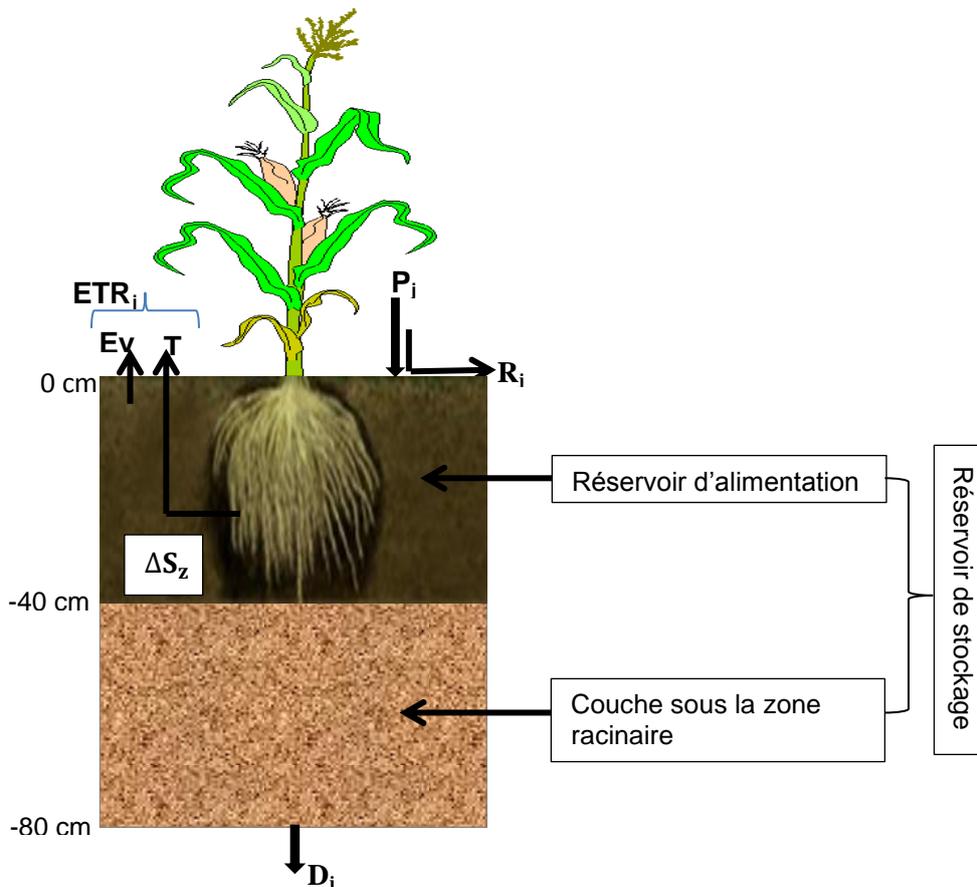


Figure 4-9 : Coupe verticale du sol et les termes du bilan hydrique

Source : *Chaim Doto*

$$S_j = S_{j-1} + P_j + I_j - R_j - D_j - ETR_j \quad (4-11)$$

où : S_j et S_{j-1} [L] représentent respectivement les stocks d'eau aux jours j et $j - 1$ (c'est-à-dire le jour précédent), I_j [L] est la dose d'irrigation le jour j , P_j [L] la pluie incidente le jour j , R_j [L] la lame d'eau ruisselée et D_j [L] le drainage en dessous de la zone racinaire le jour j .

Le stock d'eau du sol dans le réservoir de stockage de chaque unité expérimentale a été déterminé par la formule suivante (4-12) :

$$S_j = (\theta_{10} \times 150) + (\theta_{20} \times 100) + (\theta_{30} \times 100) + \dots + (\theta_{80} \times 50) \quad (4-12)$$

où θ_i ($i = 10; 20; \dots 50$) est l'humidité volumique à la profondeur i le jour j .

La pluie incidente P_j a été mesurée au moyen d'une station agrométéorologique standard WatchDog 2000 (modèle 2900ET) et un pluviomètre à enregistrement automatique installés sur le site d'expérimentation (**Figure 4-10**). Cette station agrométéorologique a également permis de mesurer tous les paramètres climatiques en particulier l'ETo grâce à la formule de Penman-Monteith dont l'approche de calcul est intégrée dans cette station.

Les doses d'irrigation I_j ont été déterminées à partir du volume d'eau V_a [L^3] apporté à la parcelle et de la surface arrosée S_p [L^2]:

$$I_j = \frac{V_a}{S_p} \text{ avec } V_a = V_{j\text{avant}} - V_{j\text{après}} \quad (4-13)$$

où $V_{j\text{avant}}$ et $V_{j\text{après}}$ les volumes d'eau stockée dans le BCER juste avant et après l'irrigation du jour j .

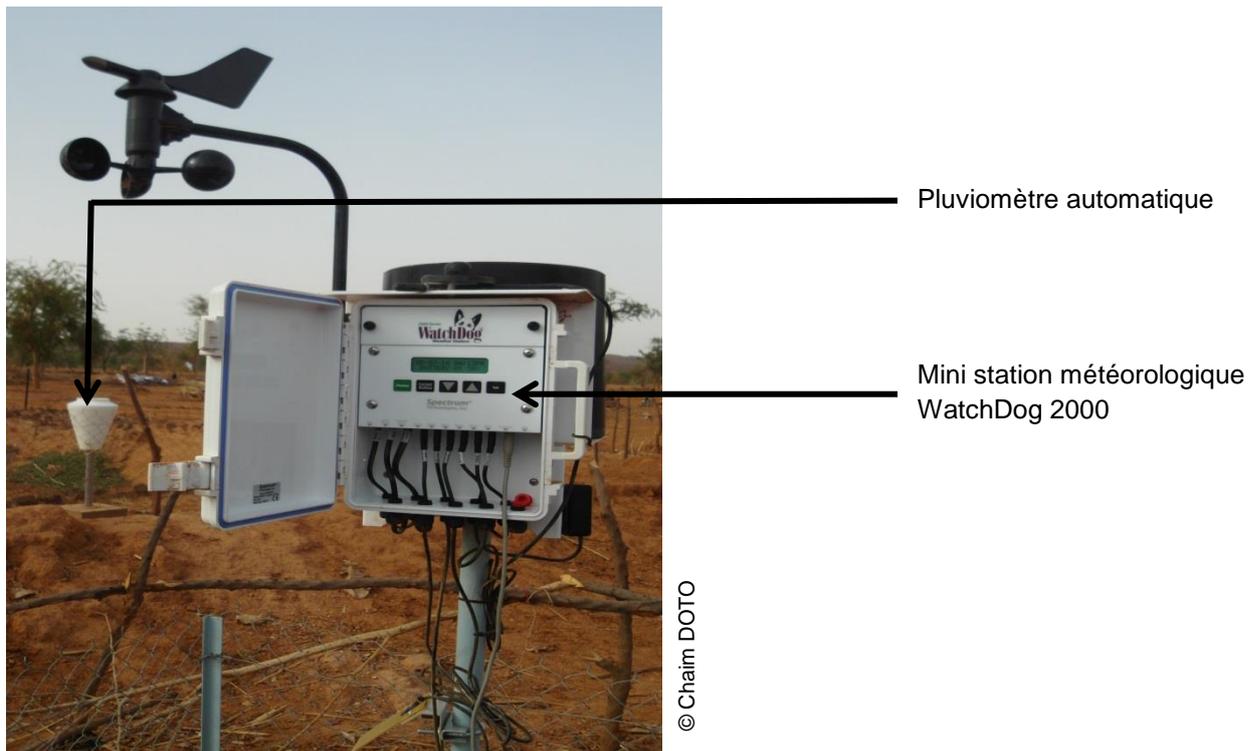


Figure 4-10 : Mini station météorologique et pluviomètre automatique

Le drainage D_j a été estimé à la profondeur d'enracinement maximale de 80 cm grâce aux mesures tensiométriques relevées à 70 et 90 cm. Pour évaluer ce drainage, la loi de Darcy (2-1) du **chapitre 2** a été utilisée.

La conductivité hydraulique insaturée $K(h)$ se trouvant dans l'équation de Darcy a été déterminée par la méthode d'infiltrométrie à disque à succion contrôlée sous deux succions

(2 cm et 4 cm) en régime quasi-permanent (**chapitre 2**). Cette conductivité hydraulique a été déterminée à 60 cm et 80 cm de profondeur dans un profil pédologique. Le dispositif de mesure et la mise en œuvre se trouvent en **annexe 4** (section 4.1.).

L'intégration de l'équation de Darcy au pas journalier (Somé et Ouattara, 2005) a permis d'établir quotidiennement la lame d'eau drainée. L'équation ainsi obtenue se présente comme suit :

$$D_j = \bar{q}\Delta t \quad (4-14)$$

où \bar{q} est le flux hydrique moyen sur l'intervalle de temps $\Delta t = 86400s$ correspondant à deux mesures successives de la charge de pression h .

Ainsi, l'équation (4-11) présente deux termes inconnus (ETR_j et R_j). Cette situation nécessite alors une condition supplémentaire sur l'un de ces termes afin d'estimer le second. Dans le dispositif expérimental, R_j peut être considéré comme nul puisque les parcelles ont été billonnées. Les billons avaient une hauteur d'environ 30 cm et les raies (sillons) ont été également butées à leur extrémité. Cependant, pour valider cette hypothèse, un bilan d'eau a été également effectué dans le réservoir d'alimentation.

Le stock d'eau journalier dans le réservoir d'alimentation a été déterminé grâce au suivi de l'humidité volumique du sol et de la dynamique racinaire. La relation permettant la détermination de la variation de ce stock d'eau s'écrit :

$$\Delta S_z = \Delta\theta \times z_j \quad (4-15)$$

où ΔS_z [L] est la variation du stock d'eau entre les jours $j - 1$ et j , $\Delta\theta$ [L^3L^{-3}] est la variation de l'humidité volumique du sol dans le réservoir d'alimentation entre les jours $j - 1$ et j , z_j [L] est la profondeur d'enracinement au jour j . z_j est égale à la profondeur densément explorée par les racines le jour j .

Ainsi, l'évapotranspiration réelle journalière (ETR_j) du maïs va dépendre du niveau de remplissage du réservoir d'alimentation. Elle a été exprimée comme suit :

$$ETR_j = \Delta S_z \quad \text{si } 0 \leq \Delta S_z < ET_c \quad (4-16)$$

$$ETR_j = ET_c \quad \text{si } \Delta S_z \geq ET_c \quad (4-17)$$

$$\text{avec } ET_c = k_c \times E_o \quad (4-18)$$

où ET_c [L] représente l'évapotranspiration de la culture en absence de stress hydrique ou en condition d'eau non limitée. Cette grandeur peut être déterminée à partir de l'évapotranspiration de référence ET_o et du coefficient cultural k_c sous deux approches possibles (Allen *et al.*, 1998). La première approche utilise le coefficient cultural simple qui cumule les effets de l'évaporation du sol (E_v) et de la transpiration (T_a) de la plante (ici le

maïs) alors que la deuxième approche dénommée « *Dual crop coefficient* » appréhende séparément ces deux termes et représente celle utilisée dans le cadre de cette étude. Cette deuxième approche bien adaptée à l'irrigation à la raie a été amplement décrite par Allen *et al.* (1998).

4.5.3. Etablissement du bilan d'eau sur le BCER

Pour l'étude du bilan d'eau sur le BCER deux instruments ont été installés. Il s'agit d'une échelle limnimétrique (**Figure 4-11a**) pour la détermination des hauteurs d'eau disponible dans le BCER et d'un bac d'évaporation classe A (**Figure 4-11b**) pour l'évaluation de l'évaporation sur le BCER. Pour étendre l'évaporation bac à celle du BCER, un coefficient de correction égale à 0,7 a été utilisé selon les recommandations de Doorenbos et Pruitt (1977).

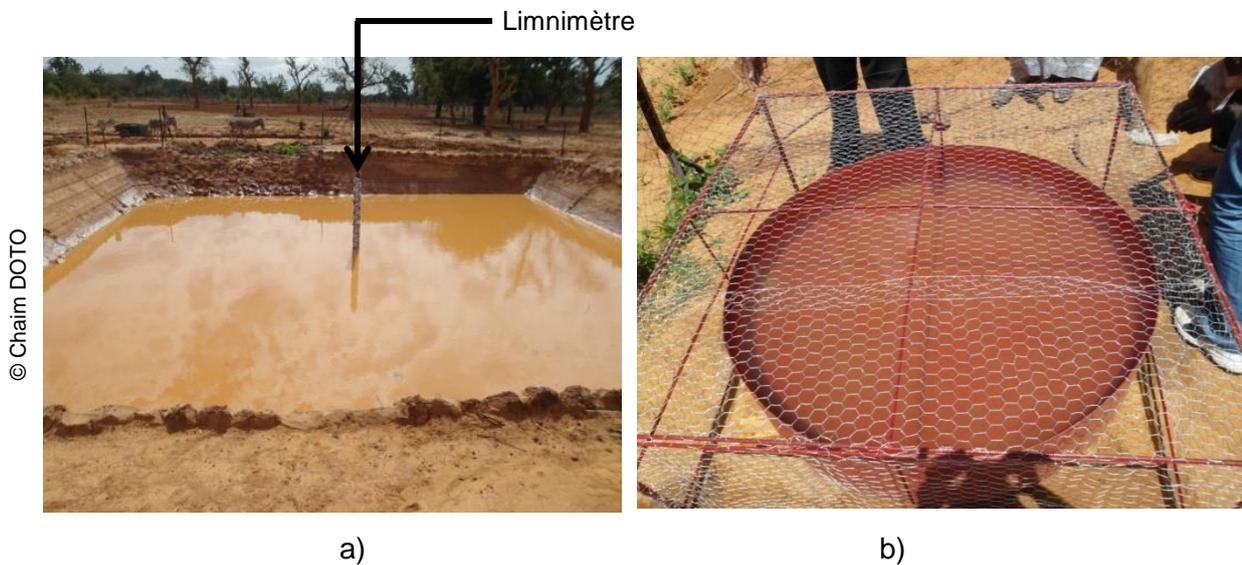


Figure 4-11 : Limnimètre sur le BCER (a) et bac d'évaporation classe A (b)

Le suivi journalier de la variation temporelle de la lame d'eau dans le BCER a été réalisé sur les campagnes agricoles 2013-2014 et 2014-2015. Cette lame d'eau a été déterminée à l'aide du système d'équations (4-19) en tenant compte de la superficie théorique à irriguer estimée à 0,2 ha.

$$\begin{cases} \frac{V_j}{V_T} = \frac{h_{ej}}{H_b} \\ L_j = 1000 \times \frac{V_j}{S_p} \end{cases} \quad (4-19)$$

où V_T [L^3] est le volume total du BCER, V_j [L^3] est le volume d'eau stockée dans le BCER le jour j , h_{ej} [L] est le niveau d'eau dans le bassin relevé sur le limnimètre le jour j , H_b [L] est la profondeur totale du BCER, S_p [L^2] est la superficie à irriguer et L_j [L] est la lame d'eau disponible pour irriguer les 0,2 ha.

Pour le bassin d'étude, $V_T = 283 \text{ m}^3$ et $H_b = 1,6 \text{ m}$. Ainsi, le volume d'eau actuel dans le BCER est lié à la profondeur actuelle de l'eau par la relation :

$$V_j = 176,875h_{ej} \quad (4-20)$$

Afin d'apprécier journallement la part de l'infiltration dans les sorties d'eau du BCER, la relation suivante a été utilisée :

$$L_{j+1} - L_j = -(E_j + I_{nfj} + I_j) \quad (4-21)$$

où L_j et L_{j+1} [L] sont respectivement les lames d'eau aux jours j et $j + 1$; E_j [L] est l'évaporation mesurée sur le BCER le jour j ; I_{nfj} [L] est l'infiltration d'eau dans le BCER le jour j et P_j et I_j [L] sont respectivement la pluie et la dose d'irrigation.

4.5.4. Détermination des probabilités de remplissage du BCER et de l'emblavure irrigable en maïs selon la campagne agricole

4.5.4.1. Position du problème

En condition d'eau limitée pour les besoins d'irrigation, plusieurs décisions doivent être prises pour un usage efficace de l'eau. En effet, l'eau du réservoir peut être utilisée pour irriguer une grande superficie. Cependant, si la totalité de la superficie est cultivée et irriguée, le réservoir pourrait être vidé avant la fin de la campagne agricole et la culture va échouer. Alternativement, juste une petite superficie peut être cultivée et irriguée. Il y aurait alors suffisamment d'eau et donc quelque chose à récolter mais la production serait limitée par la petite emblavure. La problématique qui en résulte est « quelle est l'emblavure à irriguer ? ».

Si le BCER est la seule source pour satisfaire les besoins en eau des cultures, le problème pourra être assez facilement résolu. Cependant, durant la campagne agricole, les événements pluvieux assurent l'alimentation en eau du réservoir et en partie ou en totalité les besoins en eau des cultures. La décision sur l'emblavure doit être prise en début de campagne. Cependant, la quantité totale de pluie reste inconnue jusqu'à la fin de la campagne. La réponse à cette problématique doit donc impliquer des probabilités, des risques, ou des moyennes de précipitations et une modélisation de l'évolution temporelle de l'eau du BCER. Etant donné que ces paramètres sont difficilement modélisables sur les campagnes futures, le BCER a été placé dans les conditions pluviométriques historiques de la période 1960-2012 afin d'étudier sa contribution à l'atténuation des séquences sèches. Ainsi, cette section a été consacrée à la détermination de la probabilité de remplissage du BCER et de la superficie optimale irrigable en maïs en fonction de la taille de l'aire de captage.

4.5.4.2. Procédure

La modélisation de la variation d'eau du BCER a été effectuée par décade jusqu'à la maturation du maïs. Le système est constitué d'une aire de captage de superficie C dans laquelle la pluie totale collectée alimente le réservoir ayant un volume total V_T .

Les pertes d'eau dans le réservoir sont constituées exclusivement :

- ✚ des infiltrations et évaporations représentant une proportion p_s de l'eau disponible V_d dans le BCER du réservoir par décade ;
- ✚ des quantités d'eau d'irrigation sur une superficie A à emblaver.

Les entrées d'eau sont constituées de la pluie qui alimente directement le BCER et du ruissellement qui dépend des caractéristiques hydrauliques de l'aire de captage et de sa superficie C . Ces entrées d'eau représentent une proportion constante p_e du volume pluviométrique par décade collecté sur l'aire de captage. Cette proportion p_e a été déterminée à partir de la limnimétrie obtenue sur le BCER « témoin » totalement imperméabilisé (**Figure 4-12**) et situé à environ 500 m du site expérimental d'étude.



© Chaim DOTO

Figure 4-12 : BCER à parois et fond imperméabilisés avec une bâche

Les variations du volume d'eau enregistrées sur ce BCER après les événements pluvieux dues uniquement à l'évaporation et aux éventuelles irrigations ont été rapportées au volume pluviométrique estimé sur son impluvium levé à 4,6 ha afin de déterminer un coefficient moyen d'alimentation en eau du BCER.

Pour l'étude du bilan d'eau sur le BCER d'étude (**Figure 4-11a**), le schéma conceptuel du système considéré est présenté à la **Figure 4-13**.

La méthodologie consiste à évaluer le bilan d'eau global dans le système afin de déterminer le déficit hydrique final. Ce déficit hydrique final a été utilisé pour estimer l'indice de satisfaction I_c des besoins en eau du maïs supposé égal à 100 lorsque les besoins en eau de la plante sont entièrement couverts (Stern *et al.*, 2006). En condition de stress hydrique, I_c tombe en dessous de 100 et a été estimé à partir de la relation suivante de Stern *et al.* (2006) adaptée pour les besoins de cette étude.

$$I_c = 100 - 100 \times \frac{\text{Déficit final}}{\sum ET_c} \quad (4-22)$$

Le déficit final (DF) a été déterminé à partir des besoins en eau d'irrigation I_v et du volume d'eau V_d disponible dans le BCER. La condition logique se présente comme suit :

$$\begin{cases} \text{si } I_v \leq V_d \text{ alors DF} = 0 \\ \text{si } I_v > V_d \text{ alors DF} = V_d - I_v \end{cases} \quad (4-23)$$

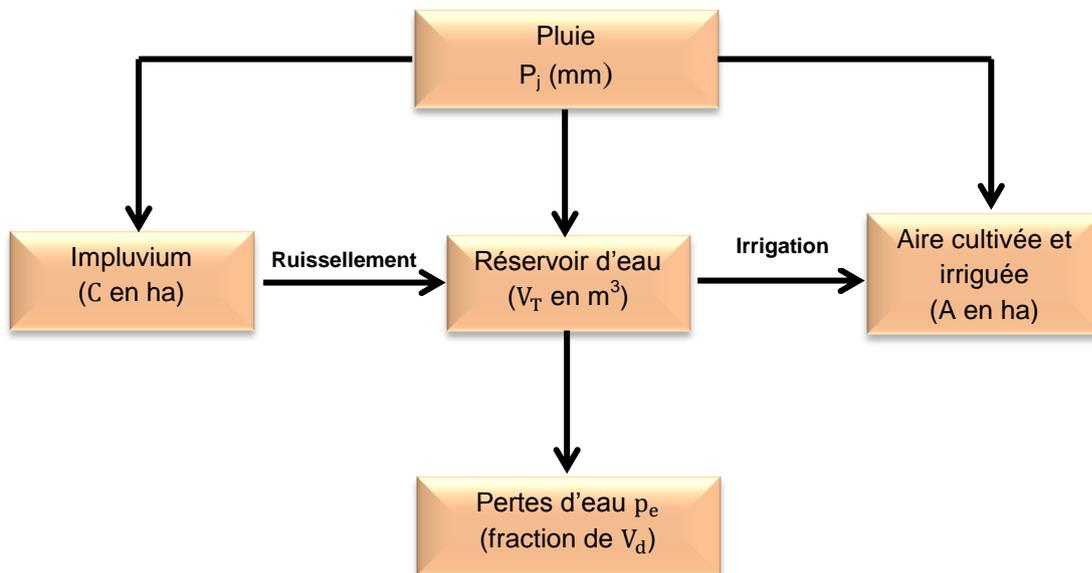


Figure 4-13 : Conceptualisation standard du système de gestion des BCER

Les campagnes agricoles considérées dans la simulation de la superficie irrigable afin de mesurer la contribution des BCER partiellement imperméabilisés à l'alimentation hydrique du maïs sont celles déclarées sèches. Le choix porté sur les campagnes sèches vient du fait que le BCER a été construit pour suppléer la pluie. Ces campagnes agricoles ont été calées en fonction des besoins en eau du maïs qui varient entre 450 et 800 mm (Doorenbos et Kassam, 1987 ; du Plessis, 2003) pour une variété moyenne et tardive (plus de 90 jours). Or la variété retenue (précoce) dans le cadre de cette étude nécessite moins de 350 mm d'eau. Ainsi, si 30% de la pluie sont perdus par ruissellement dans la zone d'étude (Niang, 2006), alors une campagne agricole sera déclarée sèche dans le cadre de cette étude si elle reçoit moins de 450 mm de pluie et humide si elle en reçoit plus. Ces campagnes proviennent de la série chronologique de 1960 à 2012 et représentent les caractéristiques moyennes des

années qui respectent la condition suscitée. Les caractéristiques de ces deux types de campagnes se trouvent au **Tableau 4-5**.

Tableau 4-5 : Caractéristiques des deux types de campagnes agricoles considérés

Type de campagne agricole	Nombre d'années	Pluie moyenne (mm)	Pluie maximale décadaire (mm)	Pluie minimale décadaire (mm)
Sèche	24	369 (56)	126 (19)	0 (7)
Humide	28	567 (79)	182 (28)	1,2 (8)

Note : les valeurs entre parenthèses représentent les écarts types

Les proportions d'entrées et pertes d'eau obtenues ont été également utilisées pour déterminer par décade les probabilités d'alimentation en eau du BCER sous trois scénarii de remplissage en fonction de l'évolution historique de la pluie décadaire sur la période 1960-2012 et de l'aire de captage. Ces scénarii de remplissage représentés par $1/2(V_T)$, $3/4(V_T)$ et (V_T) correspondent respectivement à un BCER rempli à la moitié, au trois quart et au « full » (plein) de sa capacité totale (V_T). Ces probabilités ont été calculées par décade sur la période d'avril à septembre pour chaque campagne agricole de 1960 à 2012.

4.5.5. Efficience de l'utilisation de l'eau

Pour apprécier les différentes stratégies adoptées dans la conduite des irrigations de complément, l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) a été calculée pour le rendement en grains. Elle est définie par (Zwart et Bastiaanssen, 2004; Zhang *et al.*, 2007; Neal *et al.*, 2011):

$$EUE [ML^{-3}] = \frac{Y_{act}}{ETR} \quad (4-24)$$

Où Y_{act} [M] est le rendement en grain du *Barka* ETR [L^3] est la consommation en eau du *Barka* durant la période d'essai.

4.5.6. Traitement et analyse statistique des données

Pour tester la signification de la longueur de la campagne agricole, la période 1960-2012 a été subdivisée en deux sous-périodes : 1960-1985 et 1986-2012. Ces deux sous-périodes ont été isolées compte tenu du fort déficit pluviométrique de 1984 (**Figure 3-3**) et de la rupture enregistrée en 1982 et validé par la méthode de segmentation de Hubert au seuil de 1%. Le test t de Student et de Pettitt ont été appliqués pour comparer les longueurs de la saison agricole sur ces deux sous-périodes.

De même, les probabilités pour que la longueur de la saison agricole soit supérieure à une durée donnée ont été déterminées. A cet effet, le test de Kolmogorov Smirnov a été utilisé (Razali et Wah, 2011) puisque les dates de début, de fin et la longueur de la campagne

agricole suivent une loi d'ajustement (Guèye et Sivakumar, 1992). Les probabilités ont été déterminées sur la base des durées de saison culturale supérieure à 90, 120 et 150 jours correspondant respectivement à la durée maximale du cycle cultural d'une variété précoce (< 90 jours), moyenne (90 à 120 jours) et tardive (>120 jours). Trois dates de début ont été considérées. Il s'agit des dates de début précoce, normale et tardive correspondant respectivement au premier, deuxième et troisième quartile de la distribution des dates de début de la campagne agricole.

Les données tensiométriques et humidimétriques collectées durant l'étude expérimentale ont été traitées sous le tableur Excel 2010 en vue de générer des tableaux et des graphes.

Le logiciel SAS (version 9.2) a été utilisé comme outil statistique pour la comparaison des moyennes des quantités d'eau drainées à 80 cm de profondeur à l'aide du test t de Student. La signification des rendements selon les traitements hydriques a été testée via l'analyse de variance (ANOVA) à un critère de classification. Ces différents tests ont été réalisés au seuil de probabilité de 5%.

4.6. Méthode d'optimisation de l'irrigation de complément et analyse de la contribution des BCER à la réalimentation des nappes

Une optimisation du scénario d'irrigation de complément faite sur la base des stratégies d'irrigation adoptées durant la phase expérimentale n'intégrera que les besoins en eau de la culture tout en ignorant le réservoir « sol » et l'amplitude minimale des séquences sèches qui impactent significativement la physiologie de la plante. Ainsi, pour mieux intégrer les caractéristiques agroclimatiques de la zone d'étude dans une perspective de proposer une stratégie d'irrigation de complément extensible, une modélisation numérique du phénomène serait la meilleure alternative.

En effet, la modélisation numérique est un moyen de synthétiser et de reproduire des observations. Celle-ci permet de spatialiser aisément les résultats expérimentaux sous des critères d'évaluation graphique et statistique. C'est un véritable outil de prévision et d'aide à la décision, surtout dans l'optique d'une gestion rationnelle des eaux dans une zone où elles sont rares. Bon nombre de modèles basés sur différentes théories d'approximation (différences finies, éléments finis classiques, élément finis mixtes hybrides etc.) existent dans ce domaine.

Le choix du modèle adapté à l'étude du phénomène à reproduire va donc dépendre non seulement de ce qu'on cherche à modéliser mais également de ce qu'on attend du modèle. Les mouvements d'eau dans le sol surtout dans la zone insaturée, sont très complexes et nécessitent de méthodes robustes pour mieux comprendre le processus à la base. L'expérimentation en milieu réel étant très sensible et restant un moyen local d'appréhension

de la dynamique des transferts d'eau dans le sol, une modélisation numérique peut être un moyen complémentaire de validation et d'extension des résultats expérimentaux.

Dans cette quatrième section de l'approche méthodologique adoptée, sont présentés à la suite de la justification, les caractéristiques du code retenu pour l'étude des transferts d'eau dans le sol et les paramètres pour sa mise en œuvre et son évaluation ainsi que la méthode d'optimisation du scénario d'irrigation de complément.

4.6.1. Justification du code retenu pour l'étude des transferts d'eau

La ressource en eau en milieu semi-aride comme la Province du Bam au Burkina Faso où l'agriculture pluviale est fortement menacée par les fréquentes poches de sécheresse doit être utilisée de façon efficiente pour produire davantage afin de faire face à l'insécurité alimentaire. Pour mieux optimiser cette ressource en irrigation de complément, le code HYDRUS-2D/3D (Šimůnek *et al.*, 2012 ; Šejna *et al.*, 2014), un modèle mécaniste de l'étude bi-et tri-dimensionnelle des transferts d'eau dans le sol a été utilisé et validé sur la base des résultats expérimentaux d'un essai mené en milieu réel sur trois années consécutives dans ladite zone.

Le choix de HYDRUS-2D/3D comme outil de simulation dans le cadre de cette étude repose sur le fait que ce code est basé sur l'équation de Richards adaptée à l'étude des transferts d'eau en deux ou trois dimensions dans un sol variablement saturée. HYDRUS-2D/3D possède des propriétés ergonomiques moins complexes et permet l'étude des transferts de chaleur et de substances chimiques dans un milieu saturé ou non. Les conditions aux limites (évaporation, transpiration, irrigation, etc.) peuvent être considérées sur des pas de temps de l'ordre de la seconde. Ce qui est bien adapté à l'irrigation à la raie adoptée dans cette étude puisque celle-ci est gouvernée par un processus de transfert d'eau en deux dimensions nécessitant des pas de temps infra journaliers. Il est également possible de fractionner la durée de la simulation selon le phénomène à étudier. C'est cet atout qui a poussé Tamini (2002) à utiliser ce code en une dimension pour optimiser la pratique de l'irrigation en maraîchage au Burkina Faso. En outre, HYDRUS-2D/3D évalue de manière spatiale et temporelle la précision de la simulation par calcul du bilan de masse pour estimer les pertes dues aux approximations sur les différentes variables. Ce code permet également la prise en compte du phénomène d'anisotropie et d'hystérésis. Selon Tafteh et Sepaskhah (2012), ce code est bien adapté à l'étude des processus de redistribution, des pertes d'eau et d'extraction racinaire dans le domaine de simulation.

Nombreuses sont les études qui ont été réalisées pour montrer l'utilité du code HYDRUS à simuler l'extraction d'eau par la plante (Chabot *et al.*, 2002 ; Sommer *et al.*, 2003), à prédire les effets de l'irrigation sur la distribution spatiale du drainage (Assouline, 2002) et le

transport de solutés (Ventrella *et al.*, 2000) dans un sol variablement saturé. Aussi, le code HYDRUS a été largement utilisé dans le cadre de l'étude des transferts d'eau et de substances chimiques sous une culture de maïs (Coquet *et al.*, 2004 ; Arbat *et al.*, 2013 ; Tafteh et Sepaskhah, 2012), dans les systèmes d'irrigation (Siyal *et al.*, 2009 ; Siyal, et Skaggs, 2009 ; Mailhol *et al.*, 2011) et en irrigation à la raie (Siyal *et al.*, 2012). Goncalves *et al.* (2006), Roberts *et al.* (2008 et 2009), Ramos *et al.* (2011 et 2012) se sont servi de ce code pour améliorer l'efficacité de l'irrigation dans les régions arides et semi-arides.

D'autres auteurs ont également utilisé le code HYDRUS en deux dimensions pour la validation des résultats d'étude en milieu contrôlé ou en milieu réel. Ainsi, pendant que Stamm *et al.* (2002) ont utilisé ce code pour modéliser les flux d'eau sur des sols drainés au laboratoire, d'autres auteurs (Gribb et Sewell, 1998 ; Pang *et al.*, 2000 ; Abbaspour *et al.*, 2001 ; de Vos *et al.*, 2002 ; Abbasi *et al.*, 2004) s'en sont servi pour modéliser les transferts d'eau et de solutés sur des sols drainés en milieu réel. Ces différentes études ont montré que les résultats expérimentaux sont bien reproduits par le code HYDRUS. En outre, ce code numérique a été utilisé en une dimension par Mishra et Parker (1989), Inoue *et al.* (2000), Jacques *et al.* (2002) puis en deux dimensions par Abbasi *et al.* (2003 et 2004) pour l'optimisation des paramètres hydrodynamiques du sol et de transport de solutés. Les sorties de ce code ont été également utilisées comme référence par Mmolawa et Or (2003), Doltra et Munoz (2010), Mailhol *et al.* (2011) dans le développement et la validation de nouveaux modèles de simulation.

4.6.2. Mise en œuvre de la simulation des transferts d'eau dans le sol

4.6.2.1. Circonscription du domaine de simulation et paramètres requis

D'après les suivis piézométriques réalisés durant la campagne agricole de 2014, le niveau de la nappe phréatique était au-delà de 900 cm. Ainsi, le domaine de simulation des flux d'eau a été limité à la zone maximale d'enracinement du *Barka*. Celle-ci a été obtenue via les profils racinaires réalisés à la fin des deux campagnes expérimentales 2012 et 2013 et sur les rhizotrons installés en 2014. Le domaine prenait en compte un profil de 80 cm de profondeur variablement compartimenté par couches homogènes (matériel) isolées à partir de leurs caractéristiques hydrauliques. Son étendue était de 80 cm représentant les moitiés de deux raies consécutives et un billon (**Figure 4-14**). La durée de la simulation a couvert le cycle cultural de la variété de maïs choisi qui était de 80 jours.

Le compartimentage du domaine de simulation était fonction du phénomène (évaporation, redistribution, drainage) à mettre en œuvre au regard de la gestion efficace de l'irrigation de complément. Chaque couche (ou matériel) était caractérisée par ses propriétés hydrauliques supposées uniformes sur toute sa longueur.

Pour la caractérisation hydraulique du sol, le modèle de van Genuchten - Mualem (équations 2-15 et 2-16) qui nécessite la connaissance de 7 paramètres : teneur en eau résiduelle θ_r , teneur en eau à saturation θ_s , perméabilité à saturation K_s , et quatre paramètres de forme α , n , m et l a été utilisé.

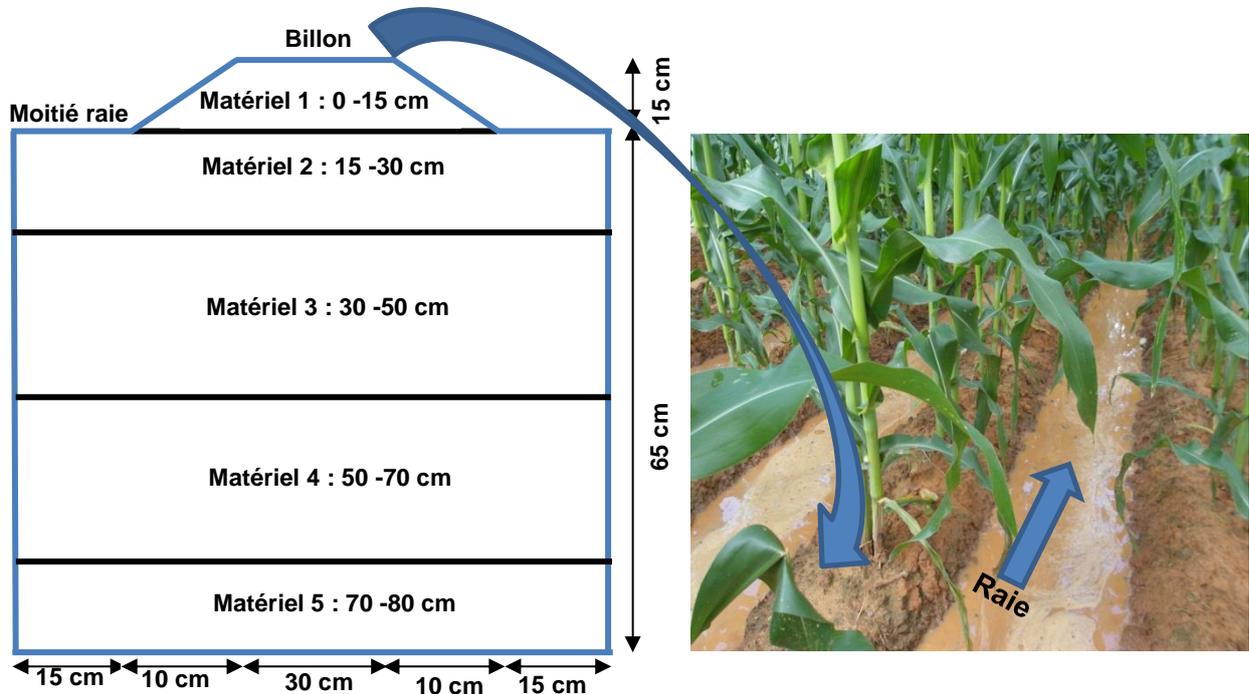


Figure 4-14: Domaine de simulation et compartimentage

L'essentiel des paramètres hydrodynamiques renseignés au **Tableau 4-6** sont d'origine expérimentale (cas de α et K_s obtenus à l'aide de l'infiltromètre à disque et du double anneau de Muntz) et modélisés (cas de θ_r , θ_s , et n) à l'aide du code RETC (Retention Curve, van Genuchten, 1991). La RETC utilise une approche d'optimisation non linéaire des moindres carrés pour estimer les paramètres inconnus du modèle de VGM à partir des données observées sur les courbes fonctionnelles du sol. Ce code en effet, minimise par itération la fonction « objectif » composée des paramètres du modèle de VGM à partir de la méthode de voisinage de Marquardt (1963). Le calage des paramètres hydrauliques a été évalué dans le code RETC grâce à des statistiques telles que l'erreur standard, T-value et les limites supérieure et inférieure de la classe de confiance. Ce calage a porté sur les paramètres α et K_s (voir **Tableau 4-6**). Des détails peuvent être consultés dans les travaux de Daniel et Wood (1971) et van Genuchten (1991).

Pour valider le calage, la méthode de Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) basée sur les fonctions de pédotransfert a été utilisée. Cette dernière détermine les propriétés hydrauliques du sol via les résultats de l'analyse granulométrique et de la densité apparente du sol.

Tableau 4-6: Paramètres hydrauliques du sol du site expérimental avant et après calage

Couche (cm)	Avant calage				Après calage			
	α ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	K_s (cm j^{-1})	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n [-]	K_s (cm j^{-1})	l [-]
0 - 15	0,03	29,76	0,05	0,39	0,02	1,42	23,76	0,5
15- 30	0,03	16,44	0,06	0,40	0,02	1,40	11,89	0,5
30 - 50	0,03	10,32	0,07	0,40	0,02	1,40	9,87	0,5
50 – 70	0,03	7,69	0,08	0,41	0,02	1,31	6,64	0,5
70 - 80	0,03	7,68	0,08	0,41	0,02	1,29	6,99	0,5

4.6.2.2. *Maillage du domaine de simulation*

Le maillage d'éléments finis a été construit en divisant le profil du sol en éléments linéaires dont les tailles ont été définies par les coordonnées (x, z) des nœuds définis par les extrémités des éléments. Le maillage triangulaire était celui utilisé pour le domaine d'échange et a été généré sous HYDRUS-2D/3D. La taille des éléments a augmenté progressivement de la surface du sol vers la profondeur. Le nombre de mailles élémentaires générées a été de 3022 pour 1588 nœuds.

4.6.2.3. *Définition des conditions initiales et aux limites du domaine de simulation*

Une fois le domaine circonscrit et maillé, l'étape la plus fondamentale était la précision des conditions qui prévalaient au début de la simulation et celles imposées aux frontières.

❖ *Conditions initiales*

La définition de la condition initiale peut être faite sur la charge de pression ou sur la teneur en eau au début de la simulation. Dans le cadre de cette étude, la condition initiale a été faite sur le profil de charge de pression obtenu au niveau des cannes tensiométriques le jour précédant le début de la simulation pour chaque campagne agricole. Ce choix optionnel se justifie par le fait que les outputs étudiés sont les teneurs en eau. Il serait alors intéressant que les conditions initiales soient précisées en termes de charge de pression afin de mieux évaluer la fidélité du modèle puisque ces deux variables sont liées par la courbe de rétention en eau.

❖ *Conditions aux limites*

La **Figure 4-15** résume les conditions limites appliquées au domaine de transfert. Cette figure montre que le domaine de simulation a été inférieurement limité par la profondeur maximale d'enracinement (80 cm) mesurée durant l'expérimentation et gouverné par le drainage libre. Le niveau initial de l'eau dans la raie est égal à zéro jusqu'à ce que la raie soit mise en eau. Une fois la raie mise en eau, l'infiltration débute et continue jusqu'à ce que toute l'eau passe dans le sol. Ce qui génère tout le long de ce processus d'infiltration une charge de pression variable. Ainsi, une charge variable a été appliquée dans les raies prenant en compte la fraction humide du sol lors des irrigations et une condition atmosphérique (précipitations,

évaporation) sur toute la surface durant les évènements pluvieux. La profondeur maximale de l'eau par raie a varié de 1 cm à 8 cm et supposée constante durant toute la durée sur laquelle elle a été appliquée. Une fois la lame d'eau infiltrée, la condition de charge devient une condition atmosphérique. Cependant, pour des pluies supérieures à 20 mm, la condition de charge variable a été également appliquée dans les raies sur une durée maximale de 90 minutes sur la base des observations effectuées après les pluies. Celle-ci émane du fait qu'après les grandes averses, une certaine quantité d'eau est stockée dans les raies et s'infiltrent progressivement.

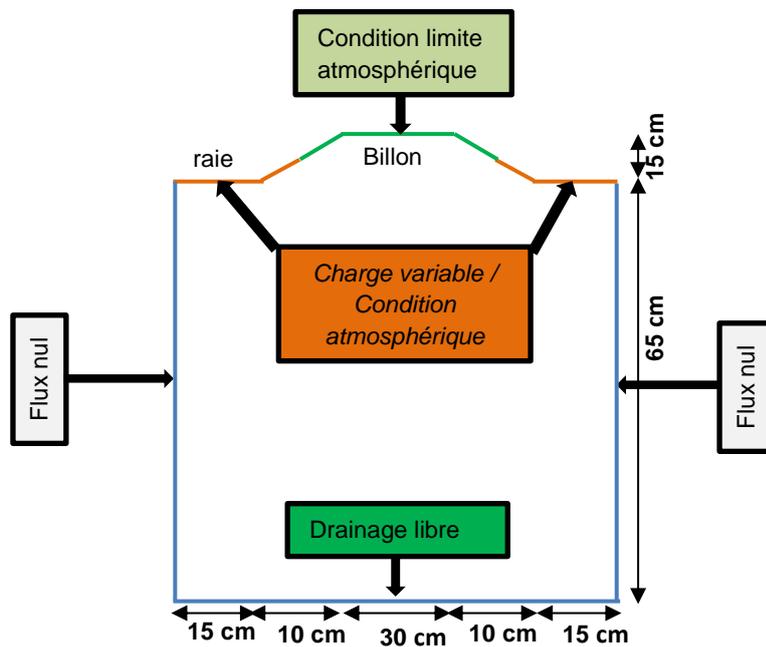


Figure 4-15: Représentation du domaine de simulation et les conditions limites

Au vu de la symétrie du domaine, un flux nul a été imposé à gauche et à droite du domaine de simulation puisqu'une lame d'eau est appliquée par raie.

Le calcul de la transpiration a été fait à partir de la méthode « *Dual crop coefficient* » amplement décrite par Allen *et al.* (1998). Pour sa mise en œuvre, le logiciel SIMDualKc Rosa *et al.* (2012a et 2012b) a été utilisé pour l'implémentation de la procédure. Ainsi, dans le cadre de cette étude, seules les valeurs de $k_{cb\ mid} = 1,15$ et $k_{cb\ end} = 0,5$ ont subi un ajustement selon les recommandations de Allen *et al.* (1998) puisque $k_{cb\ ini} = 0,15$. Les paramètres climatiques (u_2 et RH_{min}) utilisés pour l'ajustement aux conditions climatiques locales ont été mesurées au moyen de la mini station agrométéorologique installée sur le site. Une fois les coefficients ajustés aux conditions climatiques locales, les trois valeurs ($k_{cb\ ini}$, $k_{cb\ mid}$ et $k_{cb\ end}$) obtenues ont été utilisées pour calculer le coefficient cultural de base durant une phase donnée (**Tableau 4-2**).

L'horizon d'évaporation considérée pour l'établissement du bilan hydrique journalier était de 10 cm. La lame d'eau transpirée par le maïs dans l'horizon superficielle du sol a été considérée comme nulle dans le cadre de cette étude. Ceci se justifie par le fait que l'horizon densément colonisé par les racines de maïs se situe entre 30 et 60 cm alors que l'épaisseur de l'horizon d'évaporation était égale à 10 cm. Cette approche « *Dual crop coefficient* » a permis d'obtenir les deux paramètres clés (évaporation et transpiration) pour l'implémentation de la condition limite atmosphérique sous HYDRUS 2D/3D.

❖ *Fonction d'extraction racinaire*

Les paramètres de la fonction de prélèvement d'eau par les racines sont tirés des travaux de Wisseling (1991) sur le maïs. Les valeurs caractéristiques de la charge de pression de la fonction de réponse au stress hydrique adaptées aux conditions de la présente étude (Feddes *et al.*, 1978) sont renseignées au **Tableau 4-7**. La dynamique racinaire a été obtenue à partir des rhizotrons installés sur une profondeur de 100 cm.

Tableau 4-7: Paramètre de la fonction d'extraction racinaire

Paramètres	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	r_T (cm.h ⁻¹)
Valeurs	-15	-30	-325 et -600	-8000	0,5 à 0,1

Note : h_1 = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est amorcée

h_2 = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est maximale

h_3 = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau amorce sa décroissance correspondant au taux de transpiration potentielle r_T .

h_4 = valeur de la charge de pression en dessous de laquelle l'extraction d'eau est nulle

Source : Wisseling (1991)

4.6.2.4. *Calage du modèle*

Durant cette étape fondamentale les paramètres du modèle ont été ajustés de telle sorte que les outputs correspondent aux valeurs expérimentales mesurées au champ ou au laboratoire. D'où la nécessité de la mise en place et la conduite des essais en milieu réel pour la collecte des données indispensables aussi bien pour la mise en œuvre du modèle que pour son évaluation. Cependant le processus d'ajustement aboutit souvent à des paramètres qui ne caractérisent que les conditions actuelles et non celles qui prévaudront dans le futur (Ezui, 2001). Pour pallier cette situation, Aboudrare *et al.* (1999) proposent qu'un petit nombre de paramètres du modèle soit ajusté de manière à obtenir une simulation satisfaisante. Ce travail préalable à la validation du modèle est nécessaire pour mesurer son degré de fiabilité. Dans le cadre de cette étude, le calage a été effectué sur la base des données expérimentales de la campagne agricole de 2012 et concerne surtout les valeurs de α et de K_s . Les valeurs de α et de K_s obtenues à partir de l'infiltrométrie ont été ajustées à

celles modélisées par la fonction de pédotransfert de Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) de manière à augmenter la fidélité du modèle à reproduire les teneurs en eau dans le sol.

4.6.3. Evaluation et validation du modèle

Le calibrage effectué dans des conditions climatiques et édaphiques bien déterminées n'aura de valeurs prédictives que localement. Une fois calibré, le modèle doit être évalué. Cette évaluation est la précision avec laquelle le modèle décrit un système réel d'où la nécessité de comparer les prédictions du modèle avec les mesures expérimentales autres que celles utilisées pour le calage.

Dans ce sens, l'analyse statistique et graphique sont des outils très utilisés dans l'appréciation de la qualité d'un modèle. Ainsi, à travers les méthodes graphique et statistique, les données de terrain ont été confrontées à celles simulées afin d'évaluer le code HYDRUS. Dans la méthode graphique, l'évaluation s'effectue sur la base du degré de recouvrement des deux courbes traduisant l'évolution des données d'expérimentation et celles simulées. Cette méthode d'évaluation d'un modèle impliquant une certaine part de subjectivité est moins robuste et a été renforcée par la méthode statistique. Dans la méthode statistique, le modèle a été évalué sur la base d'indicateurs pertinents d'analyse de proximité. A cet effet, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) ont été utilisés. Les expressions mathématiques sont les suivantes (Mostofa Amin, 2014):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{obs}} - \theta_i^{\text{sim}})^2} \quad (4-25)$$

$$\text{NSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{obs}} - \theta_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{obs}} - \theta_{\text{moy}}^{\text{obs}})^2} \quad (4-26)$$

où θ_i^{obs} et θ_i^{sim} [L^3L^{-3}] sont respectivement les teneurs en eau observées et simulées ; $\theta_{\text{moy}}^{\text{obs}}$ [L^3L^{-3}] est la teneur en eau moyenne observée et n est le nombre d'observations.

La prise de décision sur le degré de recouvrement des teneurs en eau observées et simulées est située idéalement à zéro pour RMSE et à 1 pour NSE. Cependant, Moriasi *et al.* (2007) ont qualifié le RMSE d'indice erroné dans l'évaluation de la performance des modèles. Ainsi, pour atténuer ce risque, la RMSE standardisée (RSR) a été calculée d'après les recommandations de Singh *et al.* (2004). L'expression proposée par Moriasi *et al.* (2007) s'écrit:

$$\text{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{obs}} - \theta_i^{\text{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{\text{obs}} - \theta_{\text{moy}}^{\text{obs}})^2}} \quad (4-27)$$

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

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

Le processus de validation des résultats est primordial pour la spatialisation du modèle dans des conditions agroclimatiques différentes de celles utilisées lors du calage. C'est une confrontation graphique ou statistique (au seuil de 5%) des sorties du modèle et des résultats d'une série d'expériences. Cependant, il faut garder à l'esprit que le modèle parfait ne sera jamais construit et que la validation d'un modèle sur une grande échelle n'est pas évidente.

Pour la validation du code HYDRUS retenu dans le cadre de cette étude, les données des campagnes expérimentales 2013 et 2014 ont été utilisées.

4.6.4. Processus d'optimisation du scénario d'irrigation de complément

Les saisons pluvieuses se succèdent mais ne se ressemblent pas. La distribution des pluies à l'intérieur d'une campagne agricole est très erratique alors que l'eau disponible dans le BCER n'est pas infinie. Les traitements hydriques testés dans l'étude expérimentale de l'irrigation de complément ne couvrent que les phases sensibles du maïs et n'intègrent pas les éventuelles longues poches de sécheresse qui peuvent subvenir en dehors des périodes d'apport ciblées. Ainsi, une optimisation du scénario d'irrigation de complément intégrant les paramètres agroclimatiques s'impose afin d'être à même de faire face aux éventuelles poches de sécheresse.

Deux éléments clés ont été considérés dans la procédure d'optimisation du scénario d'irrigation de complément. Il s'agit de l'indicateur de déclenchement de l'irrigation de complément et de la dose à appliquer. Le premier fait appel à la détermination du seuil de pluie efficace pour l'entretien du réservoir en eau de la plante alors que le deuxième caractérise la pluie efficace pour reconstituer la réserve en eau du sol.

4.6.4.1. Détermination de l'indicateur de déclenchement de l'irrigation de complément

Cette partie est consacrée à la détermination du seuil de pluie optimale à partir duquel une sécheresse agronomique peut apparaître durant la période de culture. En effet, dans la méthode de discrétisation de la saison agricole, la difficulté majeure réside dans le choix du seuil permettant la définition des jours secs qui est une notion agronomiquement discutable. Ce seuil est généralement subjectif mais est cependant fortement dépendant des conditions agroclimatiques et de la sévérité désirée. Certains auteurs suggèrent sur la base des données climatiques des seuils arbitraires de pluviométrie. Un autre moyen qui semble plus raisonnable est la détermination des seuils de sécheresse à partir d'une analyse

fréquentielle. Ces seuils pluviométriques sont généralement basés sur l'aspect météorologique du phénomène mais n'intègrent pas l'aspect agronomique de l'efficience de la pluie. C'est la raison pour laquelle, dissocier l'étude des précipitations de celle du réservoir – sol semble être erroné. Le sol par ses caractéristiques hydrauliques va fortement influencer sur le choix de ce seuil vis-à-vis des besoins en eau de la culture. Toute chose égale par ailleurs, une pluie de 10 mm sur un sol à texture moyenne n'a pas les mêmes effets que sur un sol à texture lourde. Il est donc nécessaire d'évaluer la pluie utile à la culture et de substituer la notion de sécheresse édaphique à celle de sécheresse météorologique amplement discutée dans la bibliographie en la couplant à celle agronomique. De ce fait, la dynamique de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère est bien modélisée et constitue une véritable base pour le développement de tout projet d'irrigation surtout en zone de pénurie d'eau.

Ainsi, afin de prendre en compte les exigences temporelles du continuum sol-plante-atmosphère dans la détermination du seuil pluviométrique qui optimise la consommation en eau des plantes, la présente étude a procédé à son calage par simulation des transferts d'eau dans les sols cultivés de la zone en cause sur la base de leurs propriétés hydrauliques via le code HYDRUS-2D/3D. Ce code, a permis de déterminer sur une décade le temps de redistribution de l'eau et la profondeur atteinte dans un sol variablement saturé sous différents scénarii d'occurrence de pluie. L'analyse pédoclimatique a été faite sur une décade tout simplement parce qu'elle correspond d'une part à la capacité de stockage et de restitution de l'eau utilisable d'un sol à caractéristiques hydrauliques moyennes et d'autre part à la précision nécessaire pour l'établissement d'un calendrier cultural.

Les quatre classes de sol de la province du Bam caractérisées dans le **chapitre 3** ont été considérées. Les caractéristiques hydrauliques de ces sols sont renseignées au **Tableau 4-8**.

Ces paramètres ont été obtenus grâce au réseau neurone de prédiction de Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) basé sur les fonctions de pédotransfert et incorporé au code HYDRUS. Ce tableau montre que la couche arable (0 – 30 cm) présente une teneur en eau à saturation moyenne de $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ pour une conductivité hydraulique à saturation de $19,43 \text{ cm j}^{-1}$ et une pression d'entrée d'air plus élevée (114 cm) sur les sols hydromorphes contre une moyenne de 43 cm pour les autres sols de la province. Ainsi, étant donné les caractéristiques hydrauliques exceptionnelles des sols hydromorphes, ceux-ci n'ont pas été considérés pour le processus d'optimisation.

Pour analyser la redistribution de l'eau dans le sol, une décade sèche (sans pluie) a été considérée et simulée à l'aide du code HYDRUS-2D/3D (Šimůnek *et al.*, 2013) pour un sol cultivé en maïs et à la mi- saison. Ce qui place la procédure dans une situation extrême dans l'analyse de la dynamique de l'eau qui n'est régie que par l'évaporation d'eau dans les 10 à

15 premiers centimètres du sol et de la transpiration du maïs. Le choix de la mi-saison n'est pas subjectif. En effet, c'est durant cette période que les besoins en eau de la plante sont les plus importants et tout stress hydrique pénaliserait significativement le rendement. Aussi, la transpiration du maïs peut être considérée équivalente à l'évapotranspiration puisqu'à la mi-saison l'évaporation est négligeable compte tenu du recouvrement quasi-total du sol. Ce qui permet à cette étude de s'affranchir de la détermination des quantités d'eau perdues par évaporation et par transpiration nécessaires pour la mise en œuvre des conditions aux limites sous HYDRUS-2D/3D appliquées à la surface du sol. Les conditions initiales qui prévalent au début des simulations sont équivalentes à la capacité au champ. Autrement dit, les variables d'état du sol au début de la simulation correspondent à celles à la capacité au champ. La distribution des pluies à l'intérieur de la décade n'est pas prise en compte dans ce travail contrairement à l'évapotranspiration. Celle-ci a été supposée constante sur la décade et équivaut à celle déterminée durant l'étude statistique de la campagne agricole.

Tableau 4-8 : Caractéristiques hydrauliques des sols dans le Bam

Classe de sol	Couche (cm)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n [-]	K_s (cm j^{-1})	l [-]
Sols brunifiés	0 – 30	0,07	0,39	0,02	1,35	12,87	0,5
	30–100	0,08	0,43	0,02	1,30	5,42	0,5
Sols ferrugineux tropicaux lessivés	0 – 30	0,05	0,39	0,03	1,39	30,67	0,5
	30 – 100	0,07	0,40	0,02	1,31	8,70	0,5
Sols hydromorphes peu humifères	0 – 30	0,09	0,46	0,01	1,48	12,32	0,5
	30 – 100	0,09	0,47	0,02	1,3	10,6	0,5
Sols peu évolués d'apport	0 – 30	0,05	0,39	0,02	1,41	21,86	0,5
	30 – 100	0,07	0,40	0,02	1,36	9,69	0,5

Note : θ_r et θ_s désignent respectivement les teneurs en eau résiduel et à saturation, α est l'inverse de la pression d'entrée d'air, K_s est la conductivité hydraulique à saturation, n est l'indice de distribution de la taille des pores et l est le paramètre de connectivité des pores.

Source : BUNASOLS

4.6.4.2. Construction du scénario d'irrigation de complément en maïsiculture

La mise en place d'une telle régie d'irrigation d'appoint a été rendue possible grâce aux caractéristiques hydrauliques moyennes¹ des sols du Bam et de l'analyse des profils hydriques obtenus par simulation sous HYDRUS-2D/3D en irrigation à la raie. Quatre scénarios d'occurrence des cumuls de pluies décadaires ont été considérés : une décade sans pluie (D1), et trois décades enregistrant respectivement un cumul de 10 mm (D2), 40 mm (D3) et 50 mm (D4) de pluie. La décade sèche D1 a été utilisée pour déterminer le temps correspondant au tarissement admissible ($p = 0,5$ et $0,6$) de l'eau du sol à partir de la

¹ Les caractéristiques hydrauliques moyennes ont été obtenues sur la base des caractéristiques hydrauliques singulières des sols brunifiés, ferrugineux tropicaux lessivés et peu évolués d'apport.

condition initiale où l'état hydrique du sol correspond à la capacité au champ. Les autres décades ont servi à la détermination de la dose d'irrigation d'appoint nécessaire pour reconstituer la réserve en eau utile du sol à partir des conditions hydriques obtenues au point de tarissement admissible. Les cumuls pluviométriques de ces trois dernières décades sont issus d'une analyse fréquentielle des séries chronologiques décennales de 1960 à 2012 pour une période de retour de 10 ans. A cet effet, la loi de Gauss a été appliquée aux hauteurs pluviométriques moyennes décennales de la campagne agricole qui a porté sur trois séries :

- ✚ juin pour la période sèche ;
- ✚ juillet pour la période d'installation de la saison pluvieuse ;
- ✚ août pour le mois le plus pluvieux.

Les conditions limites à la surface du domaine sont demeurées identiques que celles de l'étude expérimentale. La condition de drainage libre a été imposée à la base du domaine de simulation. Les caractéristiques géométriques du domaine ont été les mêmes que celles présentées sur la **Figure 4-15**. Cependant, le domaine de simulation a été subdivisé ici en deux compartiments (couches) conformément au nombre de couches imposées par le **Tableau 4-8**.

4.6.5. Analyse des flux d'eau sous les BCER à l'aide de HYDRUS 2D/3D

Cette partie vise à étudier la contribution potentielle des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER) partiellement imperméabilisés à la réalimentation de la nappe phréatique sous-jacente. En effet, l'étude des flux d'eau sous les BCER partiellement imperméabilisés constitue un atout important pour analyser leur contribution à la recharge de la nappe sous-jacente et de surcroît leur efficacité dans l'atténuation des effets des poches de sécheresse. Or l'appréhension de ces flux d'eau en milieu insaturé situé au-dessus de la frange capillaire est très délicate et seule une approche numérique constitue la meilleure alternative (Carrera-Hernández *et al.*, 2012).

4.6.5.1. Paramétrage de HYDRUS-2D/3D

Sur la base des fonctionnalités disponibles sous HYDRUS-2D/3D, c'est celui de van Genuchten-Mualem qui a été retenu pour le paramétrage des courbes de rétention hydrique (équation 2-15) et de conductivité hydraulique (équation 2-16). Ces paramètres hydrauliques calés sur la base des données mesurées *in situ* et modélisés par la fonction de pédotransfert de Rosetta sont renseignés au **Tableau 4-9**. La condition initiale a été précisée en termes de charge de pression dans le profil de sol. Cette charge a été supposée diminuer linéairement de la surface (-600 cm) jusqu'à la limite inférieure du domaine de simulation (2 cm).

Les conditions à la surface du fond du bassin ont été régies par les flux d'eau dans le bassin. Ces flux d'eau dépendent de la lame d'eau disponible dans le BCER et des caractéristiques

hydrodynamiques à cette frontière. Ainsi, le fond du bassin a été assigné à un flux variable dont les variations se trouvent à la **Figure 4-16**.

Tableau 4-9: Les paramètres de la fonction de van Genuchten-Mualem

Couches (cm)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n [-]	K_s (cm j^{-1})	l [-]
0 - 15	0,05	0,39	0,02	1,42	23,76	0,5
15- 30	0,06	0,40	0,02	1,40	11,89	0,5
30 - 50	0,07	0,40	0,02	1,40	9,87	0,5
50 – 70	0,08	0,41	0,02	1,31	6,64	0,5
70 - 100	0,08	0,41	0,02	1,29	6,99	0,5
100 - 150	0,07	0,40	0,02	1,35	10,47	0,5
150 - 200	0,06	0,39	0,03	1,35	16,52	0,5
200 - 250	0,06	0,38	0,03	1,36	22,66	0,5
250 - 300	0,06	0,38	0,03	1,32	15,72	0,5
300 - 350	0,08	0,43	0,02	1,31	5,13	0,5
350 - 400	0,08	0,43	0,02	1,36	5,17	0,5
400 - 600	0,08	0,44	0,01	1,44	10,25	0,5
600 - 800	0,07	0,45	0,02	1,41	10,8	0,5
800 - 1200	0,10	0,41	0,02	1,32	6,24	0,5

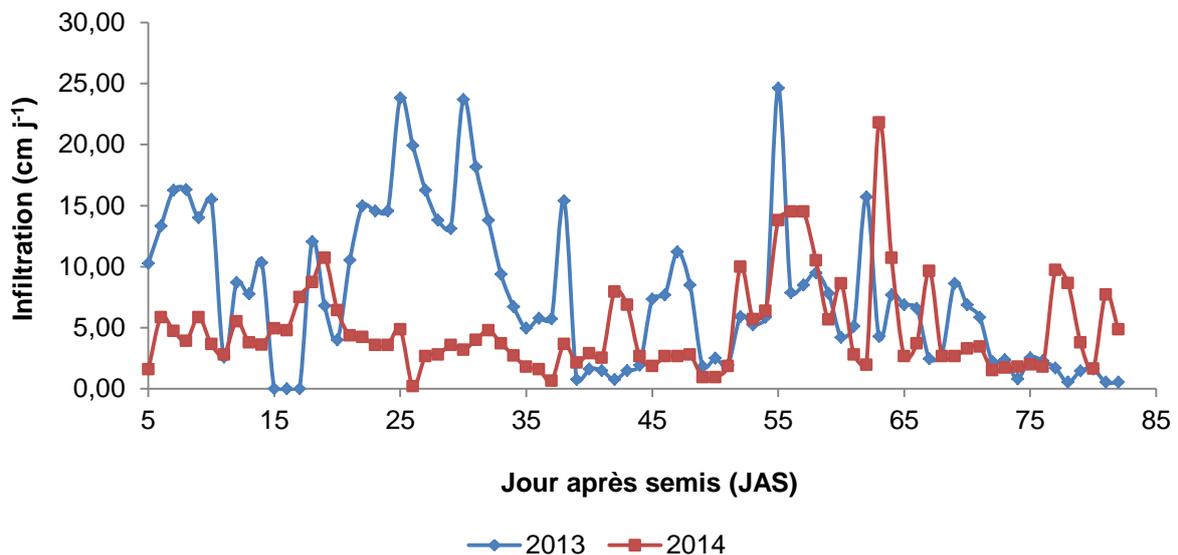


Figure 4-16: Variation temporelle de l'infiltration dans le bassin en 2013 et 2014

Les débordements sur les côtés du bassin ont été soumis aux conditions atmosphériques (pluie, évaporation). Les limites latérales perré-maçonnes ont été considérées comme des faces à flux nul ainsi que les frontières verticales. Une charge de pression variable/constante dépendant du niveau hydrostatique de la nappe a été assignée à la base du domaine de simulation. La profondeur du domaine de simulation a été fixée en fonction du niveau le plus

bas de la nappe obtenu en saison sèche. Les conditions initiales et limites ainsi que les dimensions du domaine de simulation sont résumées à la **Figure 4-17**.

4.6.5.2. *Suivi de la dynamique de la nappe sous-jacente*

Les battements journaliers de la nappe en 2014 ont été suivis sur deux puits situés respectivement à 25 m et 50 m du BCER à l'aide d'une sonde piézométrique sonore. Le dispositif tensiométrique installé sur la parcelle expérimentale pour la mesure de la charge de pression) a été utilisé. Le profil tensiométrique journalier a été établi jusqu'à un mètre de profondeur afin d'avoir une idée sur la distribution initiale de la charge de pression afin de définir les valeurs à la surface (-600 cm) et à la base (2 cm) du domaine de simulation. L'humidimétrie neutronique hebdomadaire a été réalisée jusqu'à six mètres de profondeur sur trois tubes d'accès neutroniques installés à deux mètres du BCER. Ces mesures ont permis de valider les résultats de simulation des flux d'eau sous le BCER.

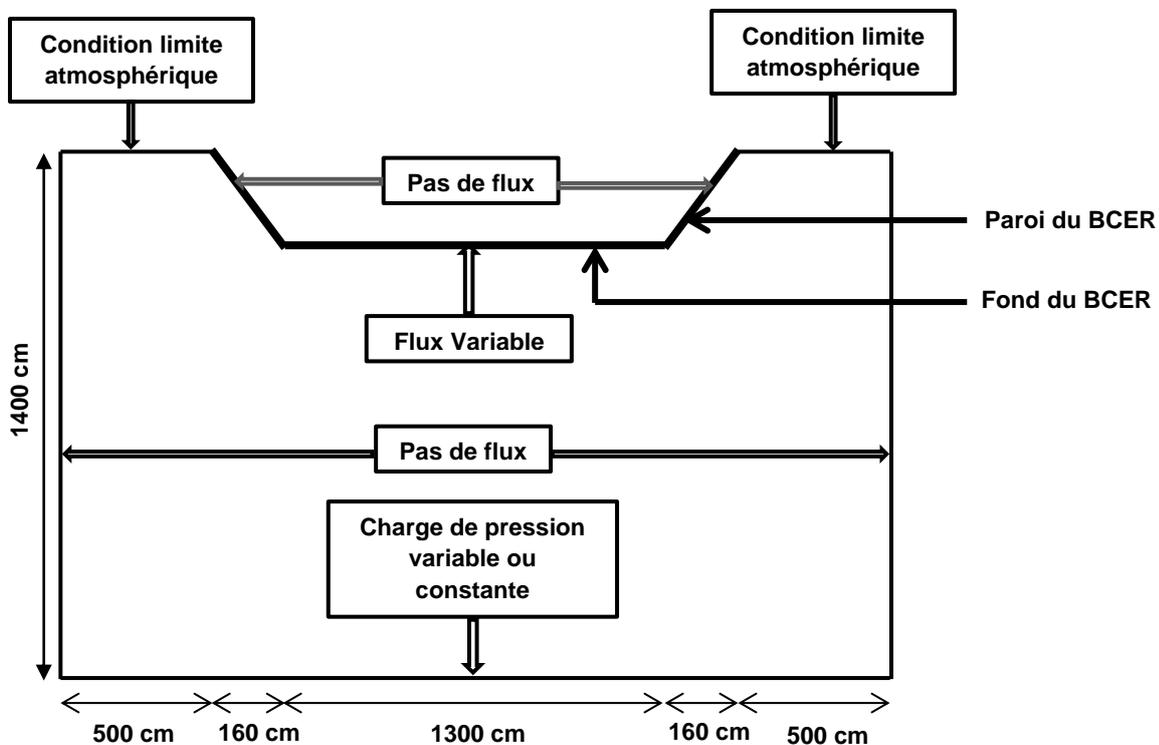


Figure 4-17: Domaine de simulation, conditions initiales et limites

4.7. Analyse socio-économique de la technologie

4.7.1. Rentabilité économique de la pratique de l'irrigation de complément

Les critères utilisés pour l'analyse de la rentabilité économique de la pratique de l'irrigation de complément sont : la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rentabilité interne (TRI) et le délai de récupération (DRA).

La VAN (équation 4-28) a été évalué à travers la somme de tous les bénéfices actualisés obtenus par la différence entre le produit brut (PB), le coût des intrants (CI) et les charges fixes (CF) relatives au dispositif d'irrigation de complément. Ces charges concernent la construction du BCER et l'achat du matériel d'exhaure. La durée d'amortissement du bassin et du matériel d'exhaure est estimée respectivement à 15 et 5 campagnes agricoles. Dans le calcul des CF par campagne agricole, ce sont les amortissements annuels du BCER et des moyens d'exhaure qui sont considérés. Un taux d'amortissement linéaire a été utilisé.

$$VAN = \sum_{t=1}^{15} \frac{PB_t - CI_t - CF_t}{(1+r)^t} \quad (4-28)$$

où t est la campagne agricole, r le taux d'actualisation estimé à 10% selon la Banque Internationale du Burkina Faso (BIB). Notons qu'avec 15 campagnes agricoles, le matériel d'exhaure doit être renouvelé trois fois. Lorsque la VAN est positive, l'investissement est jugé économiquement rentable et le projet mérite d'être entrepris. En revanche si elle est négative, l'investissement n'est pas rentable et l'introduction de la pratique de l'irrigation de complément doit être abandonnée sous peine de perdre de la valeur.

Le TRI est assimilé au taux d'actualisation qui annule la VAN. Il a été déterminé par l'équation suivante :

$$\sum_{t=0}^{10} \frac{PB_t - CF_t - CI_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (4-29)$$

L'investissement pour la mise en œuvre du dispositif d'irrigation de complément est approprié lorsque le TIR est supérieur au taux d'actualisation; dans le cas contraire il n'est pas nécessaire d'investir.

Le DRA de l'investissement est le temps d nécessaire pour que les bénéfices nets équilibrent les coûts d'investissement inhérents au dispositif d'irrigation de complément. Il a été déterminé comme suit :

$$\sum_{t=0}^d PB_t = \sum_{t=0}^d (CI_t + CF_t) \quad (4-30)$$

4.7.2. Evaluation de la contribution à la souveraineté alimentaire

Le critère retenu pour évaluer la contribution de la technologie à la souveraineté alimentaire des exploitations agricoles familiales est le nombre de personnes additionnelles à nourrir sous les normes de consommation humaine en céréales. Au Burkina Faso, la consommation annuelle en maïs est estimée en moyenne à 190 kg/personne (CILSS, 2001). La relation permettant de déterminer ce nombre additionnel de personne à nourrir est la suivante :

$$N = \frac{Y_{\text{irrigué}} - Y_{\text{pluvial}}}{190 \text{ kg/personne/an}} \quad (4-31)$$

Où $Y_{\text{irrigué}}$ (kg.ha⁻¹) est le rendement sous irrigation de complément (T1, T2, T3) et Y_{pluvial} (kg.ha⁻¹) est le rendement en régime pluvial (T0).

Conclusion partielle

Ce chapitre 4 a présenté dans sa première section le matériel végétal utilisé (variété *Barka*). Les caractéristiques du *Barka* ont porté surtout sur ses performances agronomiques et les pratiques culturales recommandées. La caractérisation statistique de la campagne agricole abordée dans la deuxième et la troisième section de ce chapitre a pour but de construire des scénarii d'irrigation de complément en fonction du risque climatique de la culture du maïs. Ces scénarii construits ont été utilisés durant la phase expérimentale afin d'étudier la contribution des BCER à l'atténuation des séquences sèches dans la zone d'étude. La cinquième section de ce chapitre a été consacrée à l'étude des transferts d'eau dans le sol sous HYDRUS-2D/3D. Cette section a présenté d'une part la démarche suivie pour la caractérisation hydrodynamique, la circonscription et la définition des conditions initiales et aux frontières du domaine de simulation et d'autre part l'évaluation de HYDRUS puis du processus de spatialisation des résultats expérimentaux. La caractérisation hydrodynamique du domaine à modéliser a consisté à la détermination des paramètres hydrauliques pour la paramétrisation des courbes caractéristiques du sol (courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique). La circonscription quant à elle a porté sur le compartimentage du domaine de simulation alors que l'évaluation du modèle a consisté à une détermination des paramètres statistiques. Quant à la spatialisation des résultats expérimentaux, elle a concerné l'optimisation du scénario d'irrigation de complément sous d'autres conditions pédologiques que celles ayant prévalu lors de l'étude expérimentale. La dernière section de ce chapitre a abordé quelques éléments d'analyse économique pour étudier la rentabilité de la pratique de l'irrigation de complément à partir des BCER.

CHAPITRE 5 : CARACTERISATION DE LA CAMPAGNE AGRICOLE ET CONTRIBUTION AGRONOMIQUE ET HYDROLOGIQUE DES BCER

La caractérisation de la campagne agricole dans un milieu semi-aride comme le Sahel Burkinabè est capitale pour une meilleure planification des activités à mener par les producteurs. En effet, elle permet à terme, de choisir les variétés adaptées et de s'assurer de l'efficacité de certaines opérations telles que les apports d'eau d'appoint aux cultures pluviales. Les éléments importants à prendre en considération dans cette caractérisation concernent les dates de début et de fin de campagne agricole ainsi que sa longueur. A ces trois éléments s'ajoutent également la distribution des séquences sèches à l'intérieur de la campagne agricole. Ces informations de précampagne (dates de début, de fin et longueur de la campagne agricole) constituent des éléments clés pour la mise en place de scénarii d'adaptation à la variabilité pluviométrique.

Ce chapitre a été organisé en trois sections présentant chacune l'analyse et l'interprétation des résultats issus des phases pré-expérimentale, expérimentale et post-expérimentale de cette étude. La phase pré-expérimentale concerne les résultats de l'étude statistique de la campagne agricole. Quant à la phase expérimentale, elle a abordé non seulement l'importance agronomique des BCER mais également les éléments d'analyse économique de la pratique de l'irrigation de complément via les BCER. Pour ce qui est de la phase post-expérimentale, les résultats de l'étude des transferts d'eau à l'aide de HYDRUS-2D/3D en vue de la spatialisation de l'importance agronomique et hydrologique des BCER ont été présentés et analysés.

5.1. Etude pré-expérimentale

5.1.1. Dates de début, de fin et longueur de la campagne agricole

La détermination de ces différents éléments se trouve à la **Figure 5-1**. L'analyse montre que les caractéristiques de la campagne agricole dans le Bam sont très variables suivant l'année et sont surtout déterminées par la fréquence et la hauteur des pluies. En 1970 aucune date n'a été trouvée conformément aux conditions imposées pour la caractérisation de la campagne (**chapitre 4**) confirmant ainsi le déficit pluviométrique prononcé enregistré durant cette année au Burkina Faso. La date moyenne de début et de fin de campagne a été située respectivement à 177 jours (24 juin) et 264 jours (19 septembre). La longueur moyenne de la campagne agricole a été de 94 jours soit trois (03) mois environ. Dans cette zone une variété tardive (>120 jours) a 13% de chance de boucler son cycle avant la fin de la campagne alors qu'une variété moyenne (90-120) en a 40% de chance contre 60% pour une variété précoce (<90 jours). Ainsi, les variétés à cycle court sont celles adaptées à l'agriculture pluviale

pratiquée dans le Sahel Burkinabè. Ce qui justifie le choix de la variété *Barka* de 80 jours dans le cadre de cette étude.

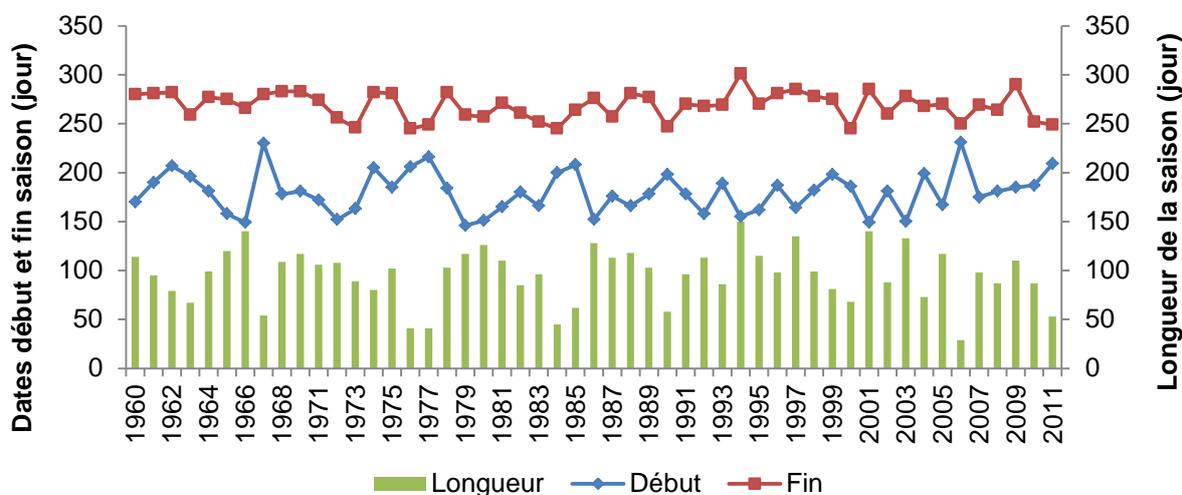


Figure 5-1 : Caractéristiques de la campagne agricole dans la province du Bam

L'analyse statistique de la longueur de la saison agricole sur les deux sous-périodes 1960-1985 et 1986-2012 isolées dans le **chapitre 4** a montré que la caractéristique de la saison agricole a peu évolué. Aucune différence significative (p -value = 0,141) n'a été observée statistiquement au seuil de 5% entre ces deux sous-périodes. Ce résultat a été confirmé par le test de Pettitt qui a révélé au seuil de confiance de 95% une stationnarité sur les deux sous-périodes. Les résultats du test de Pettitt pour les différents seuils se trouvent en **annexe 3**. Donc, les caractéristiques de la campagne agricole dans le Sahel Burkinabè restent globalement identiques ces quarante dernières années.

L'analyse faite sur la longueur moyenne de la campagne agricole est capitale mais peu informative sur le risque climatique en un lieu donné. Ainsi pour pallier cette insuffisance, l'analyse des probabilités d'occurrence d'une saison culturale de durée donnée étant donné une date de début précoce, normal ou tardif de la campagne agricole constitue une information capitale. Les dates de début précoce, normal ou tardif de la campagne agricole correspondent respectivement aux premier (12 juin), deuxième (29 juin) et troisième (14 juillet) quartile de la distribution des dates de début de la campagne agricole sus-déterminée. Les résultats obtenus sont consignés dans le **Tableau 5-1**. Les résultats du **Tableau 5-1** montrent que le démarrage précoce de la campagne agricole conduit à une probabilité élevée (92%) d'avoir une saison culturale d'au moins égale à trois mois (90 jours). Cette probabilité chute à 67% pour une date de début située au 29 juin et n'est que de 20% pour le démarrage tardif de la campagne agricole (14 juillet). La probabilité pour que la saison culturale dure plus longtemps (>120 jours) est très faible ou nulle quelle que soit la date de

démarrage de la campagne agricole. Ainsi, cette analyse confirme la nécessité de promouvoir que des variétés extra-précoces à précoces au Sahel Burkinabè.

Tableau 5-1 : Probabilité d'occurrence (%) d'une saison culturale de longueur donnée supérieure à une durée donnée sous différentes dates de début de la campagne agricole

Date de début de la campagne agricole	Durée en jour de la saison culturale			
	> 60	> 90	> 120	> 150
12 juin (précoce)	100	92	27	0
29 juin (normal)	100	67	2	0
14 juillet (tardif)	90	20	0	0

5.1.2. Détermination des décades favorables au semis dans le Sahel Burkinabè

La date de début de la campagne agricole n'est pas forcément celle qui correspond aux dates de semis. En effet, la date de début de campagne analysée du point de vue journalier est une information singulière qui peut être entachée de biais quand elle est assimilée à la date de semis. Ainsi, l'analyse décadaire des dates de début permet de prendre en compte le temps minimal de stockage et de restitution d'eau par le réservoir sol et de réduire les risques d'échec de semis. La **Figure 5-2** rend compte de la probabilité d'occurrence des dates de semis par décade. L'analyse montre que pour le mois de mai et la première décade de juin, la chance qu'un semis réussisse est faible ou pratiquement nulle. Cette chance augmente graduellement et atteint respectivement sa valeur maximale à la troisième décade de juin et la première de juillet avant d'amorcer sa chute sur les décades suivantes. Ainsi, un semis réalisé entre la troisième décade de juin et début juillet sont les périodes les plus favorables aux semis dans le Sahel Burkinabè. Ce qui confirme l'analyse faite sur la probabilité d'occurrence d'une saison culturale de longueur donnée supérieure à une durée donnée sous différentes dates de début de la campagne agricole (**Tableau 5-1**).

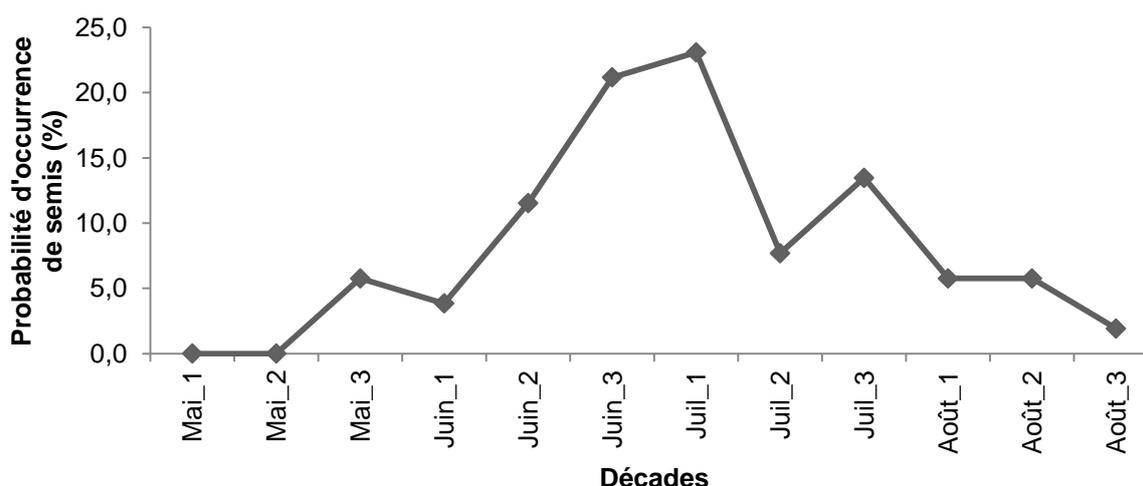


Figure 5-2 : Probabilité d'occurrence des dates de semis selon la décade

Celle-ci a été également confirmée par les résultats du niveau de satisfaction des besoins en eau du *Barka* représentés à la **Figure 5-3**. En effet, les résultats obtenus montrent que pour

une ETo journalière de 8 mm, le nombre d'années couvrant totalement l'évapotranspiration maximale (ETc) du *Barka* dans les conditions climatiques du Bam est très faible (0 à une année sur dix) durant le stade de reproduction quelle que soit la décade de semis. Cette proportion est de six à sept années sur dix pour une diminution journalière de 3 mm de l'ETo lorsque le semis est de saison (première et deuxième décade de juin) et de 0 à une année sur dix pour un semis précoce (mois de mai) et tardif (mois d'août) durant le même stade de développement. Pour les autres stades de développement les besoins en eau sont satisfaits une à neuf années sur dix. Le semis réalisé dans la troisième décade de juin semble être la période favorable au vu du niveau de satisfaction des besoins en eau du *Barka*. Nonobstant ce fait, un risque climatique se pose pour la culture du *Barka* dans la province du Bam surtout durant la phase la plus sensible (mi-saison). Ce qui démontre une fois encore la nécessité de mise en place d'un scénario d'irrigation de complément dans le Sahel Burkinabè pour parer à ces déficits hydriques afin de réduire les pertes de rendements et assurer par surcroît la souveraineté alimentaire. Cependant, cette analyse climatique va fortement dépendre des propriétés hydrauliques du sol cultivé à travers son comportement hydrique.

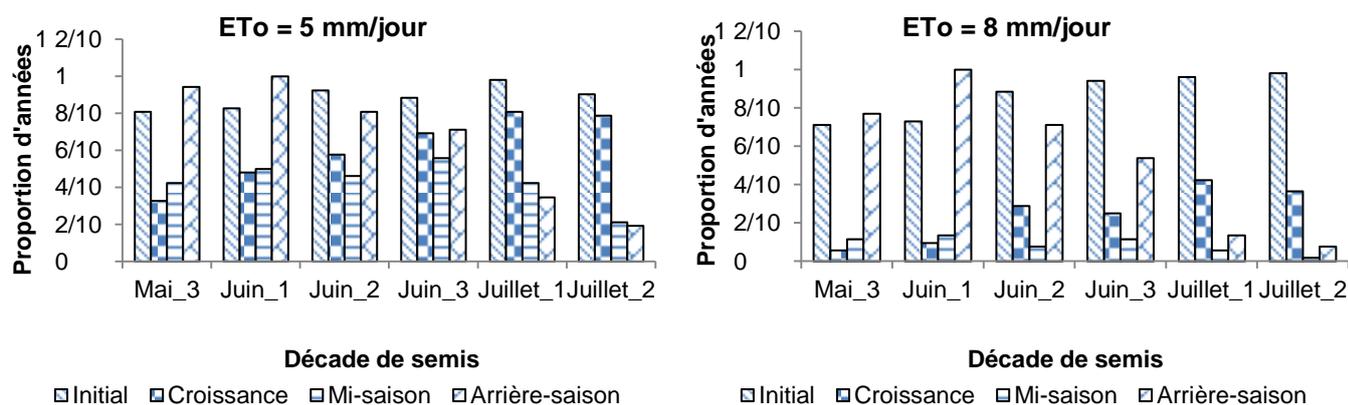
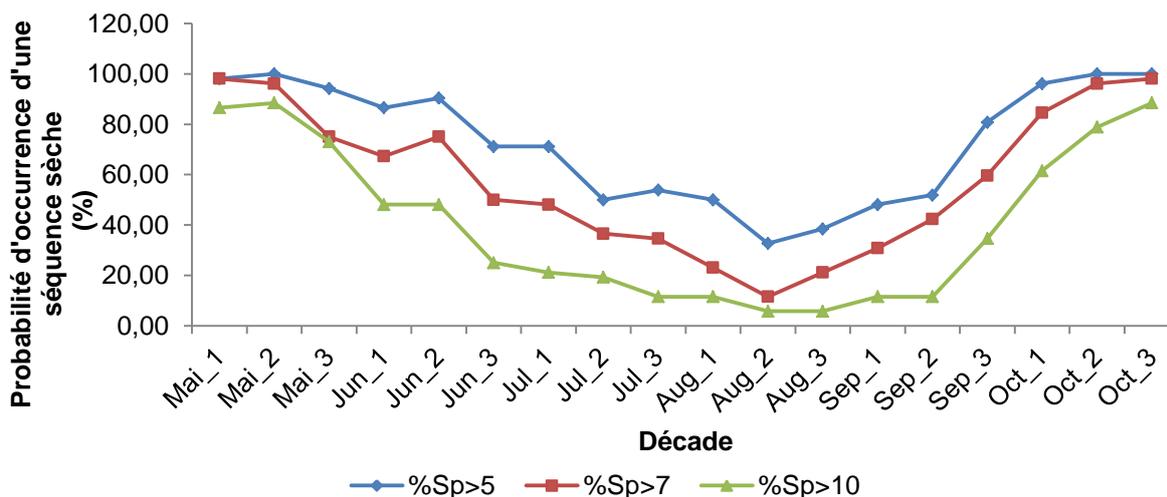


Figure 5-3: Proportion d'années couvrant l'évapotranspiration maximale du maïs

5.1.3. Distribution statistique des séquences sèches dans le Bam

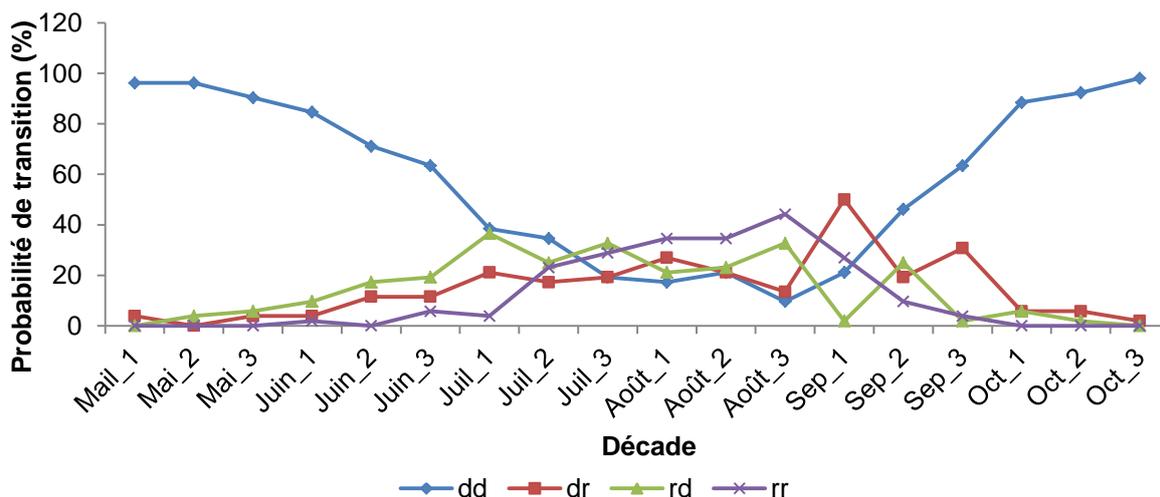
La caractérisation de la campagne agricole ne se limite pas seulement aux phénomènes qui se produisent en début et fin de campagne. Celle-ci doit s'intéresser également à l'évolution des paramètres qui affectent le plus le développement harmonieux de la culture en place. Dans ce sens, l'étude de la répartition statistique des périodes sèches à l'intérieur de la campagne constitue une donnée fondamentale dans la planification agricole. La Figure 5-4 résume l'occurrence décadaire des longues séquences sèches sur 52 campagnes agricoles.



Note : %Sp>n représente la probabilité d'avoir une séquence sèche de plus de n jours (n = 5 ; 7 ; 10).

Figure 5-4 : Probabilité d'occurrence des longues séquences sèches dans le Bam

L'analyse de la distribution des séquences sèches montre que les décades les plus sèches se trouvent en début et fin de campagne. La deuxième décade du mois d'août présente les faibles probabilités pour les quatre classes de séquences sèches considérées. Durant cette décade et une partie de la troisième décade la probabilité d'avoir plus de deux semaines sans une pluie journalière significative de 5 mm est pratiquement nulle alors qu'elle varie de 44 à 60% environ pour des séquences sèches de 5 à 10 jours. Ce qui sous-entend que même durant les mois les plus pluvieux de la campagne, le risque d'occurrence de stress hydrique est non négligeable et seule une irrigation d'appoint peut pallier cette situation. Cette analyse décadaire constitue certes une information capitale pour la planification des activités agricoles mais elle reste peu informative. En effet, les conditions climatiques d'une décade donnée sont influencées par celles ayant prévalu dans la décade précédente. Cette considération inter décadaire des séquences sèches constitue un outil robuste pour mieux caler les dates de semis. La **Figure 5-5** résume les probabilités de transition de la chaîne de Markov du premier ordre. L'analyse a révélé que la probabilité d'avoir deux décades consécutivement sèches est très élevée (60 à 96%) en début (mai-juin) et fin (septembre-octobre) de campagne. Cette probabilité passe par ses minima dans la troisième décade de juillet (19%) et dans le mois d'août (13 à 17%). A l'opposé, une décade humide succédant à une décade également humide à une probabilité d'occurrence relativement forte dans le mois d'août (35 à 44%). Ainsi, les décades les plus sèches précédées d'une décade sèche ou humide apparaissent en début et fin de campagne alors que les décades les plus humides précédées d'une décade sèche/humide se retrouvaient sur la période mi-juillet à août. Ces résultats statistiques ont montré que pour une variété à cycle court la période de semis se situe potentiellement dans la troisième décade de juin et la première de juillet.



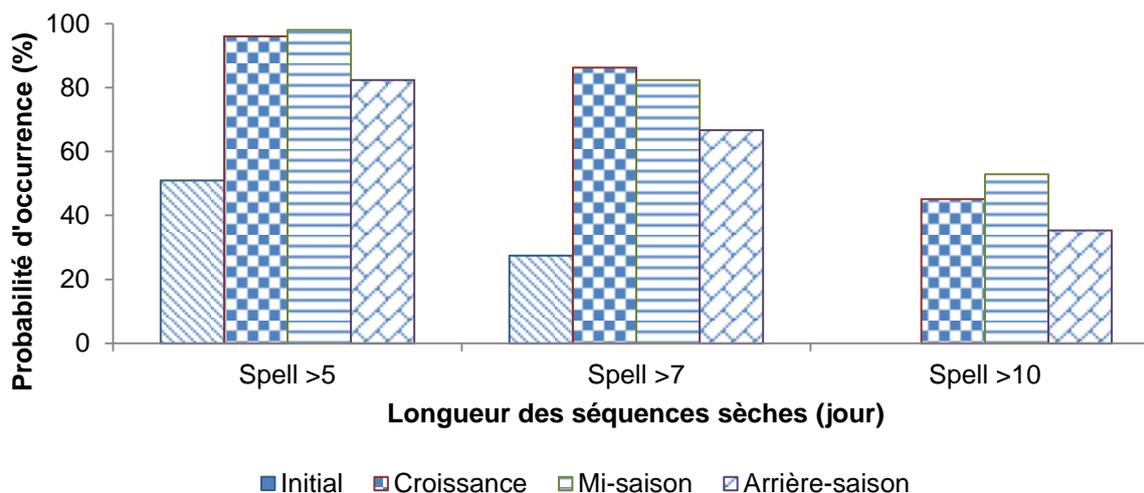
dd = une décennie sèche (d) précédée d'une décennie sèche (d) ; dr = une décennie humide (r) précédée d'une décennie sèche (d) ; rd = une décennie sèche (d) précédée d'une décennie humide (r) ; rr = une décennie humide (r) précédée d'une décennie humide (r)

Figure 5-5 : Probabilité de transition des chaînes de Markov de premier ordre

Ainsi, sous ce scénario de semis, la phase la plus sensible au stress hydrique pourra coïncider avec les décades les plus humides des mois de juillet et d'août. Cependant, l'analyse inter décadaire des séquences sèches peut renforcer cette analyse ponctuelle.

5.1.4. Impact des séquences sèches sur le développement du maïs

Pour le *Barka*, les différentes classes de séquences sèches sus-analysées affectent différemment chaque phase de ladite culture. En effet, l'analyse de la **Figure 5-6** montre que la probabilité d'avoir un type de séquence sèche d'une longueur donnée a été plus importante durant les phases de croissance et de reproduction du maïs (c'est-à-dire à la mi-saison). Cette probabilité diminue graduellement pour des séquences sèches de plus en plus longues mais tout en augmentant le risque de stress hydrique durant la mi-saison. Pour les séquences sèches de 5 à 7 jours la probabilité d'occurrence n'affectera pas le rendement si au début de la séquence la réserve utile du sol est remplie. Cependant, le stress hydrique apparaissant durant la phase la plus sensible du maïs (la mi-saison) pour une séquence sèche de plus de 7 jours affectera significativement la physiologie du maïs et par surcroît les rendements comme l'ont déjà rapporté Doorenbos et Kassam (1987). Ainsi, dans une perspective de suppléer la pluie durant ces longues séquences sèches au Sahel burkinabè, l'irrigation d'appoint, la seule alternative possible doit privilégier la mi-saison et accessoirement la phase de croissance.



Note : Spell >n représente une séquence sèche de plus de n jours (n = 5 ; 7 ; 10).

Figure 5-6 : Risque des longues séquences sèches sur le développement du *Barka*

Conclusion sur l'analyse statistique de la campagne agricole dans le Bam

Cette étude statistique de la campagne agricole dans le Sahel Burkinabè a montré qu'un risque climatique se pose pour les cultures et particulièrement le maïs. Cependant, le calage adéquat de la date de semis et la planification des irrigations d'appoint atténuent le risque de stress hydrique. A cet effet, la troisième décennie de juin et la première de juillet constituent les périodes potentiellement favorables au semis dans le Sahel Burkinabè afin de réduire considérablement les risques de stress hydrique. De plus, si une irrigation d'appoint devrait être pratiquée, la mi-saison doit être privilégiée sous les scénarii de semis sus-trouvés. Ainsi, pour valider ces deux résultats (date favorable de semis et période d'apport de l'eau d'appoint), une étude expérimentale a été menée à travers la mise en œuvre de quatre scénarii d'irrigation de complément ou traitements hydriques. Les résultats de l'étude expérimentale sont présentés dans les sections suivantes.

5.2. Etude expérimentale

Pour des raisons de simplicité dans la présentation des résultats de l'étude expérimentale, les trois campagnes agricoles 2012-2013, 2013-2014 et 2014-2015 ont été remplacées respectivement par les années 2012, 2013 et 2014 correspondant aux années de mise en œuvre des essais au champ. Les comportements agronomiques et hydriques des parcelles durant la campagne de 2012 n'ont pas été rapportés dans le présent document. Les données expérimentales collectées ont été plus utilisées dans la partie post-expérimentale pour le calage de HYDRUS.

5.2.1. Construction des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER)

La construction des BCER a été entièrement réalisée par les membres actifs de l'exploitation agricole et aidée par la communauté. La procédure était le « food for work », c'est-à-dire nourriture contre travail. Les étapes pour la construction du BCER sont : le dimensionnement du BCER, le choix du site d'implantation, la matérialisation des dimensions du BCER, l'excavation, le talutage des parois, l'aménagement de l'entrée d'eau, la stabilisation des parois, l'imperméabilisation du fond et la sécurisation du BCER. La fiche technique détaillant la procédure de construction des BCER se trouve en **annexe 5**. Il faut noter que quinze BCER ont été construits au Sahel Burkinabè dans le cadre du projet. Ceux-ci sont répartis en quatre types selon l'imperméabilisation. Il s'agit : des bassins à fond et parois non imperméabilisés, des bassins à fond imperméabilisé avec de l'argile et parois cimentées, des bassins à fond bâché et parois cimentée et des bassins à fond et parois bâchés. Les premiers sont plus adaptés aux sols à texture lourde, les deuxièmes arrivent bien sur les sols à texture moyenne alors que les deux derniers sont convenables aux sols à texture légère. Précisons également que les BCER ont été construits de telle sorte que l'eau collectée provienne non seulement des sols encroûtés (routes, sentiers, etc) mais également des parcelles cultivées. La surface occupée par le BCER était de 240 m² et aucun espace n'est réservé à la collecte des eaux de ruissellement comme l'exige la technique de demi-lune et du *zaï* où un espace non cultivé est nécessaire pour assurer la collecte des eaux pluviales.

5.2.2. Effet des traitements hydriques sur la croissance en hauteur des plantes

Le suivi hebdomadaire de la croissance en hauteur du maïs durant les deux campagnes agricoles de 2013 et 2014 est présenté à la **Figure 5-7**. L'analyse de cette figure montre que l'évolution de la hauteur des plantes de maïs *Barka* se caractérise par trois rythmes de croissance aussi bien dans les parcelles irriguées que dans les parcelles non irriguées :

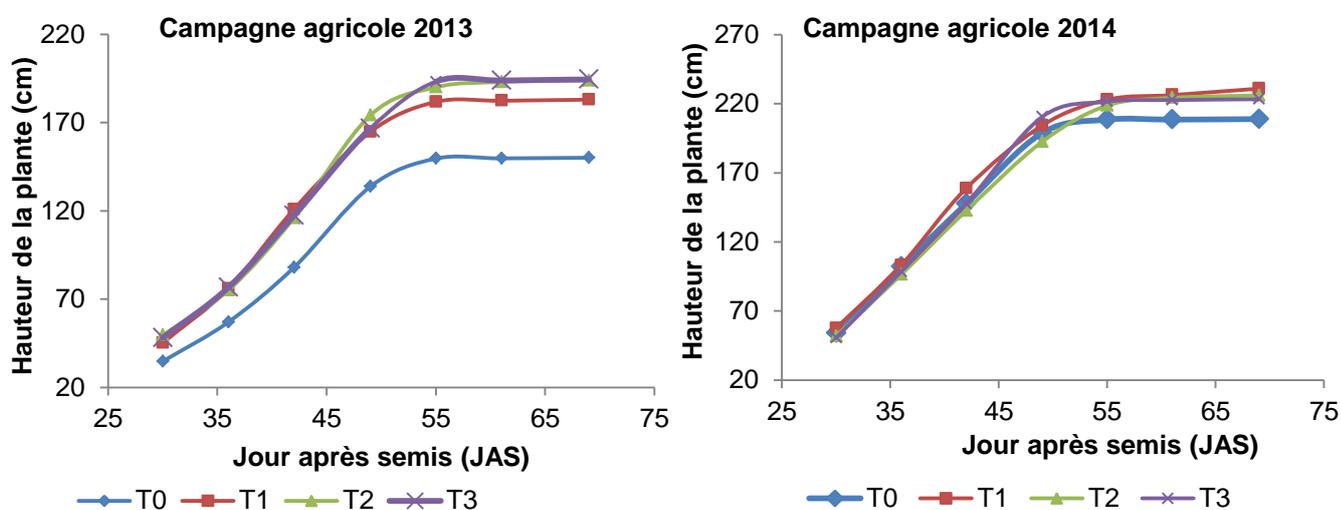


Figure 5-7 : Evolution de la hauteur des plants de maïs en 2013 et 2014

✓ la première partie qui s'étend de la levée jusqu'à 49 JAS est caractérisée par une croissance accélérée des plantes de maïs. A la fin de cette partie, les plantes ont atteint en 2013 une hauteur moyenne de 103 cm dans les parcelles irriguées et 78 cm dans les parcelles non irriguées contre respectivement 126 et 125 cm en 2014.

✓ la deuxième partie est caractérisée par une allure de croissance lente des plantes jusqu'à 61 JAS. La hauteur moyenne atteinte en 2013 a été de 189 cm dans les parcelles sous irrigation de complément et de 150 cm en régime pluvial. En 2014, les plantes ont atteint une hauteur moyenne de 223 cm sous irrigation de complément et 209 cm en régime pluvial.

✓ la dernière partie débutée autour du 61^{ème} JAS a été caractérisée par un arrêt de la croissance verticale des plantes. Les plantes à la fin de cette période incluse dans le stade de formation et de grossissement des grains ont atteint une hauteur moyenne de 190 cm en 2013 et 227 cm en 2014 dans les parcelles sous irrigation de complément. La croissance en hauteur sous le témoin pluvial n'a pas évolué par rapport à la phase précédente. Le gain de croissance de 37 cm obtenu dans les parcelles sous irrigation de complément est dû au confort hydrique dans lequel ont évolué les plantes durant la mi-saison de la campagne agricole de 2014. Ce confort hydrique a été surtout dû aux irrigations de complément pratiquées en début (37^{ème} JAS) et vers la fin (48^{ème} JAS) de la séquence sèche de 8 jours (44 à 51 JAS) observée durant la mi-saison.

En résumé l'analyse montre une augmentation régulière des plantes qui s'est stabilisée à partir du 55 JAS. Cette stabilisation signifie que la variété *Barka* appartient à la catégorie des variétés à croissance déterminée. Le suivi de la croissance des plantes a montré à la mi-saison (stade de reproduction) une croissance moyenne de 161 cm dans les parcelles en régime pluvial et 168 cm pour celles sous irrigation de complément. Aucune différence significative au seuil de 5% n'a été observée selon les traitements d'après l'analyse de variance en **annexe 6** (section 6.1. et 6.2.). Cette similarité de croissance est imputable aux dates de semis qui correspondent aux périodes favorables de semis identifiées lors de l'étude statistique. Aussi, en 2014 le fait que les raies soient butées en aval a favorisé une croissance pratiquement homogène sous tous les traitements hydriques. Ce qui n'a pas été le cas en 2013.

5.2.3. Effet des traitements hydriques sur la dynamique racinaire

Le développement racinaire du maïs a été étudié sur deux rhizotrons et sur deux profils racinaires installés sur les parcelles sous les traitements hydriques T0 et T3. La **Figure 5-8** montre l'architecture racinaire à la mi-saison sous T3. Le développement du système racinaire a été identique sous T0 et T3. Cette dynamique racinaire a révélé un développement radial de 20 cm pour une profondeur maximale de 80 cm sur les deux

groupes de parcelles (**Figure 5-8a**). La couche 0-60 cm a été celle densément colonisée comme l'illustre la **Figure 5-8b**. La similarité de configuration racinaire sous T0 et T3 stipule que le développement des racines s'achève bien avant la mi-saison, période sur laquelle les irrigations de complément ont été appliquées.

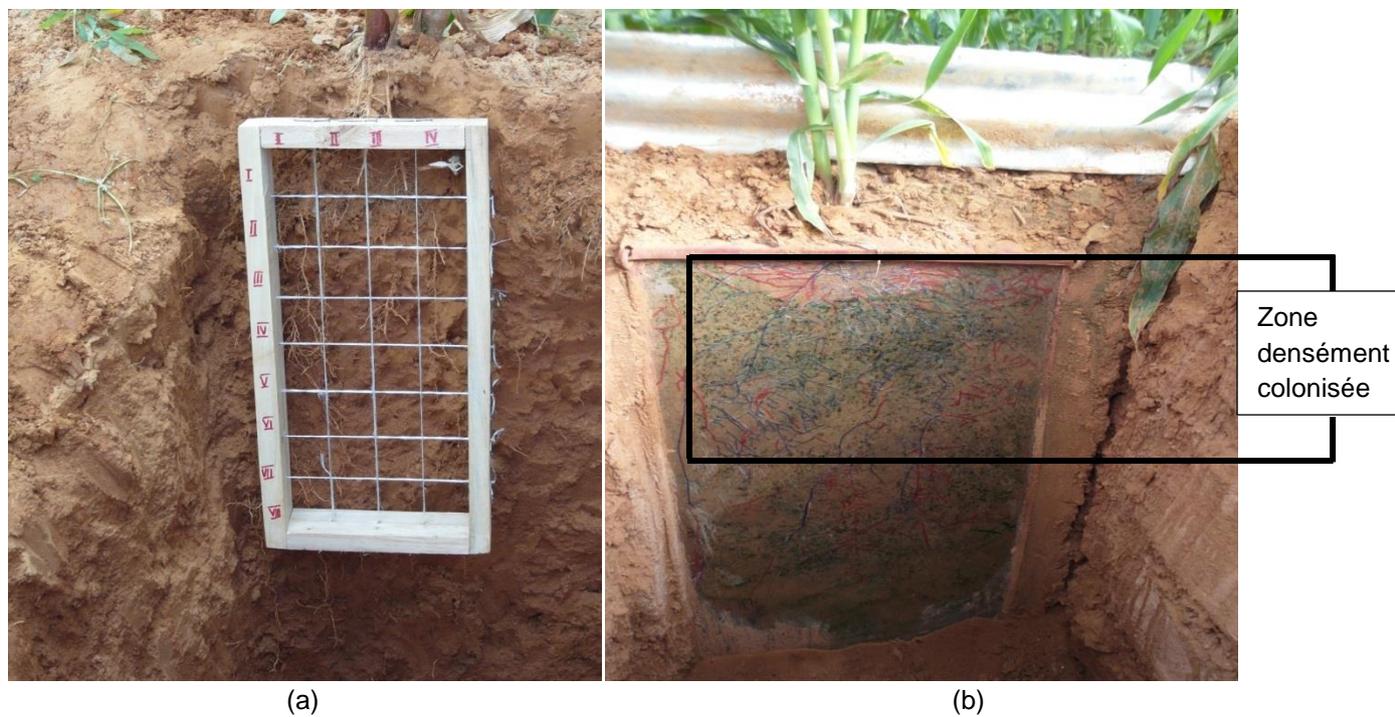


Figure 5-8 : Cartographie du développement racinaire du maïs

5.2.4. Etude des transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère et bilan d'eau sur le BCER

La dynamique de l'eau a été étudiée au niveau de chaque unité expérimentale à partir des mesures tensio-neutroniques et concerne surtout le stock d'eau dans le profil de sol et le drainage à 80 cm de profondeur.

5.2.4.1. Variation des pluies journalières et des doses d'irrigation d'appoint

L'évolution temporelle des hauteurs de pluie journalière et des doses d'irrigation d'appoint est présentée à la **Figure 5-9**. Dans la suite du présent document, seuls les résultats des campagnes agricoles 2013 et 2014 ont été considérés car tous les scénarii d'irrigation de complément n'ont pas été appliqués durant la campagne agricole 2012.

L'analyse de la **Figure 5-9** montre que les deux campagnes agricoles présentent une évolution semblable du point de vue de la distribution temporelle de la pluie. La distribution des pluies est plus homogène en 2013 qu'en 2014, campagne durant laquelle un nombre élevé de pluies consécutives a été observé. La pluie moyenne journalière a été de 21 mm en 2013 et 23 mm en 2014 avec un écart type respectif de 17,6 mm et 17,9 mm. Sur la durée de l'essai, la pluie totale enregistrée a été de 454 mm et 493 mm respectivement pour 2013

et 2014. Les trois séries d'irrigation d'appoint ont visé la mi-saison (40^{ème} - 65^{ème} jour après semis) et ont été appliquées à la fin d'une période sèche de durée variable. Par exemple, la première série d'irrigation de complément a été appliquée après 8 jours recevant moins de 10 mm de pluie en 2013 contre 4 jours en 2014.

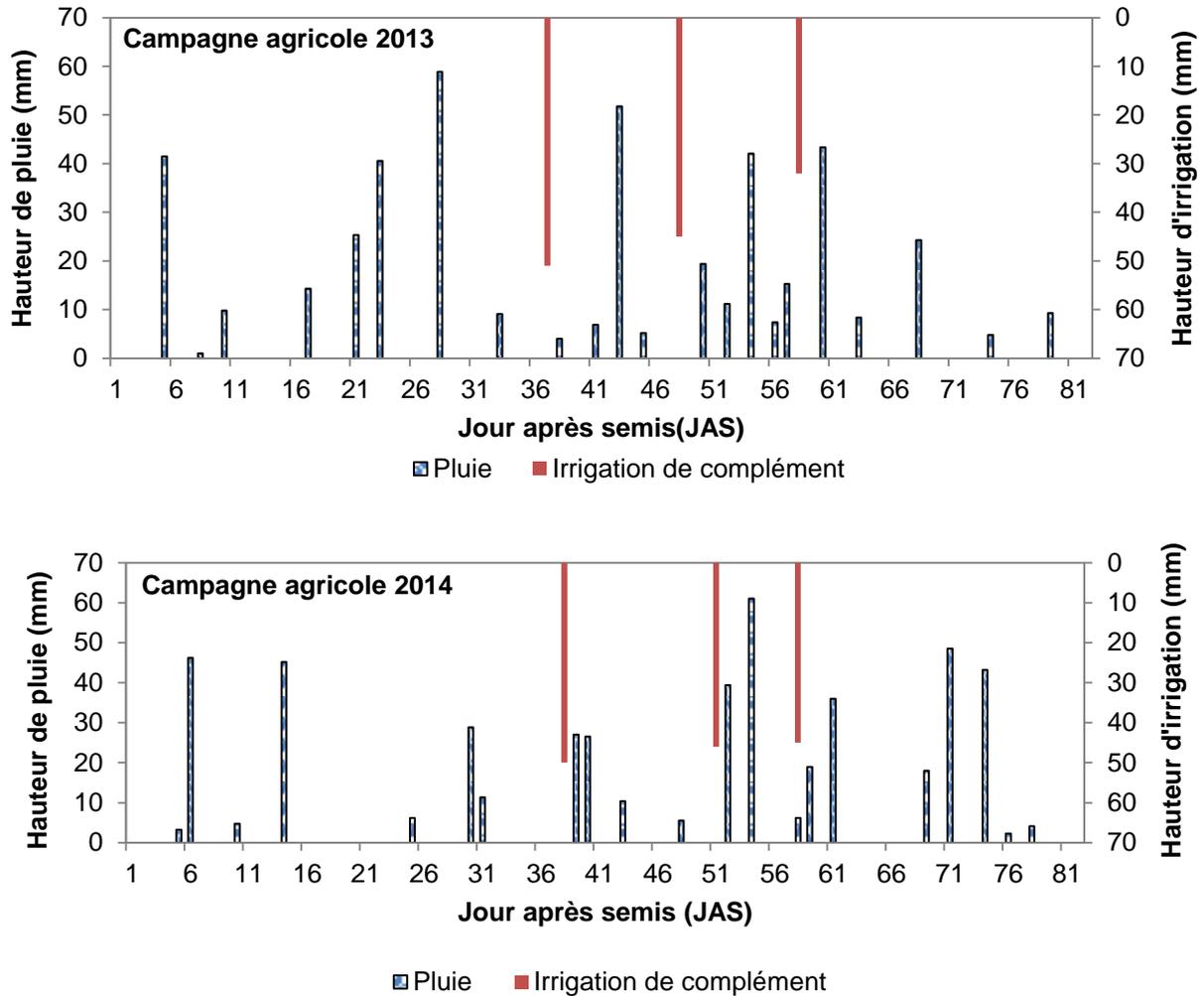


Figure 5-9 : Evolution des hauteurs de pluies et des irrigations de complément

5.2.4.2. Evolution temporelle du stock d'eau à 15 cm

L'évolution temporelle du stock d'eau dans la couche d'évaporation (0-15 cm) et des lames d'eau sur les différents traitements est représentée à la **Figure 5-10**.

L'analyse des courbes de la **Figure 5-10** montre une variation assez importante du stock d'eau dans la couche superficielle du sol. Cette variation est très sensible au rythme des pluies qui peuvent provoquer une augmentation allant jusqu'à 70% le lendemain. Les différentes irrigations appliquées ont provoqué une augmentation significative de la réserve en eau dans l'horizon d'évaporation à l'exception de celles appliquée le 58^{ème} jour après semis (JAS) en 2013 et 60^{ème} JAS en 2014. Ces deux irrigations n'ont pas été bénéfiques

pour la plante car la dose a été relativement faible et n'a pas permis d'assurer une augmentation du stock d'eau sur les 24 heures.

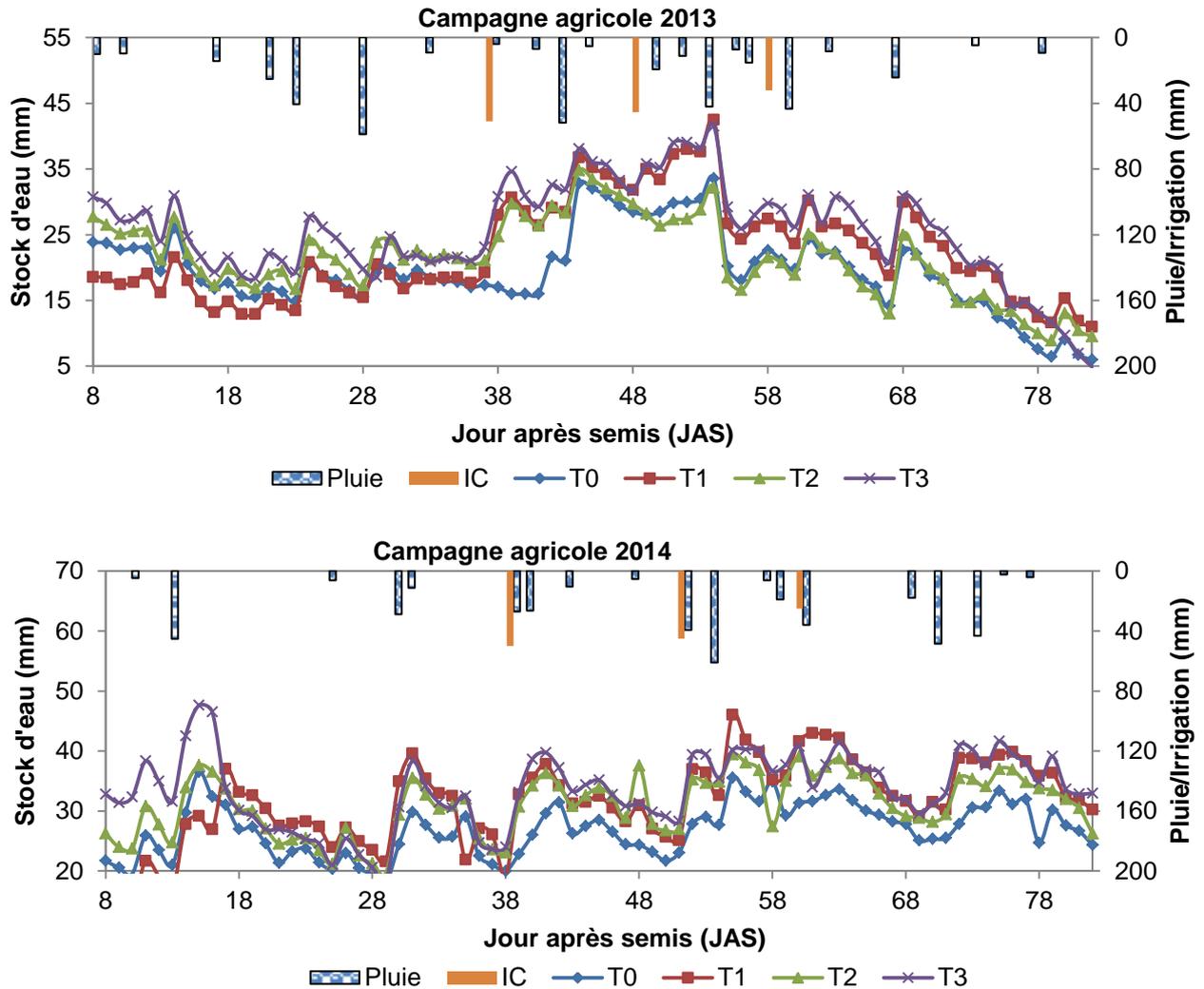


Figure 5-10 : Variation temporelle du stock d'eau à 15 cm en fonction des lames d'eau

5.2.4.3. Evolution temporelle du stock d'eau à 80 cm et des séquences sèches

Le stock d'eau dans la zone racinaire en fonction de l'alimentation en eau du profil durant les deux campagnes agricoles 2013 et 2014 est présenté à la **Figure 5-11**.

En 2013, le stock d'eau a fluctué en fonction du régime des pluies du 28^{ème} JAS au stade de reproduction du maïs (40^{ème} – 65^{ème} JAS) où l'eau disponible dans le sol a atteint sa valeur maximale. La réduction du stock d'eau observée après la pluie du 54^{ème} JAS est due à la redistribution de l'eau dans le profil. La teneur en eau mesurée juste à la fin de la pluie ne permet pas encore de détecter une réaction à la profondeur 80 cm parce que le front d'infiltration était encore dans les premiers horizons du sol. L'irrigation de complément appliquée les 37^{ème} et 48^{ème} JAS a provoqué une augmentation respective du stock d'eau de 17 à 46% et de 10 à 13%.

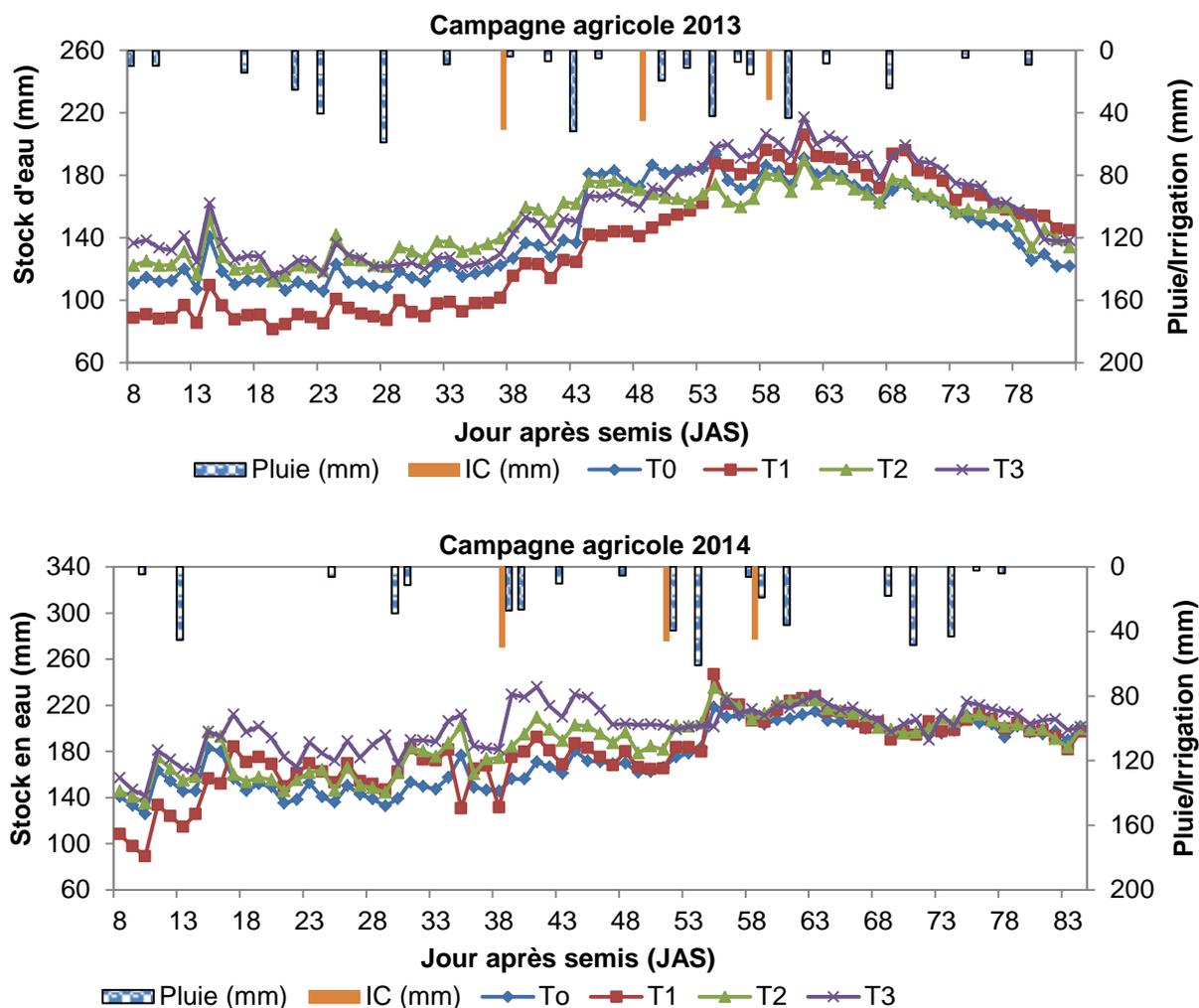


Figure 5-11 : Variation temporelle du stock d'eau à 80 cm en fonction des lames d'eau

En 2014, le stock d'eau total du sol de la surface jusqu'à 80 cm de profondeur a varié entre 89 mm et 247 mm contre 81 mm et 217 mm en 2013. Cette différence résulte en grande partie de la différence des hauteurs de pluie entre les deux campagnes agricoles (454 mm de pluie en 2013 contre 493 mm de pluie en 2014) et des pluies journalières consécutives enregistrées les 30 et 31^{ème} JAS d'une part et les 39 et 40^{ème} JAS d'autre part. En outre, le fait que l'extrémité aval des sillons ait été butée en 2014 a favorisé plus l'infiltration de l'eau dans les parcelles suite à l'augmentation du temps de séjour de l'eau dans la parcelle. Une augmentation de 6 à 33% et de 1 à 2% a été obtenue en 2014 après les irrigations supplémentaires appliquées respectivement au 38^{ème} et 51^{ème} JAS. Ces faibles contributions par rapport à celles obtenues en 2013 sont dues à la teneur en eau initiale du sol qui est plus élevée avant les apports d'eau complémentaire de 2014.

La variation temporelle de la pluie a montré que les séquences sèches de six jours ont eu lieu une fois en 2013 entre le 11^{ème} et le 16^{ème} JAS comme le montre la **Figure 5-12**.

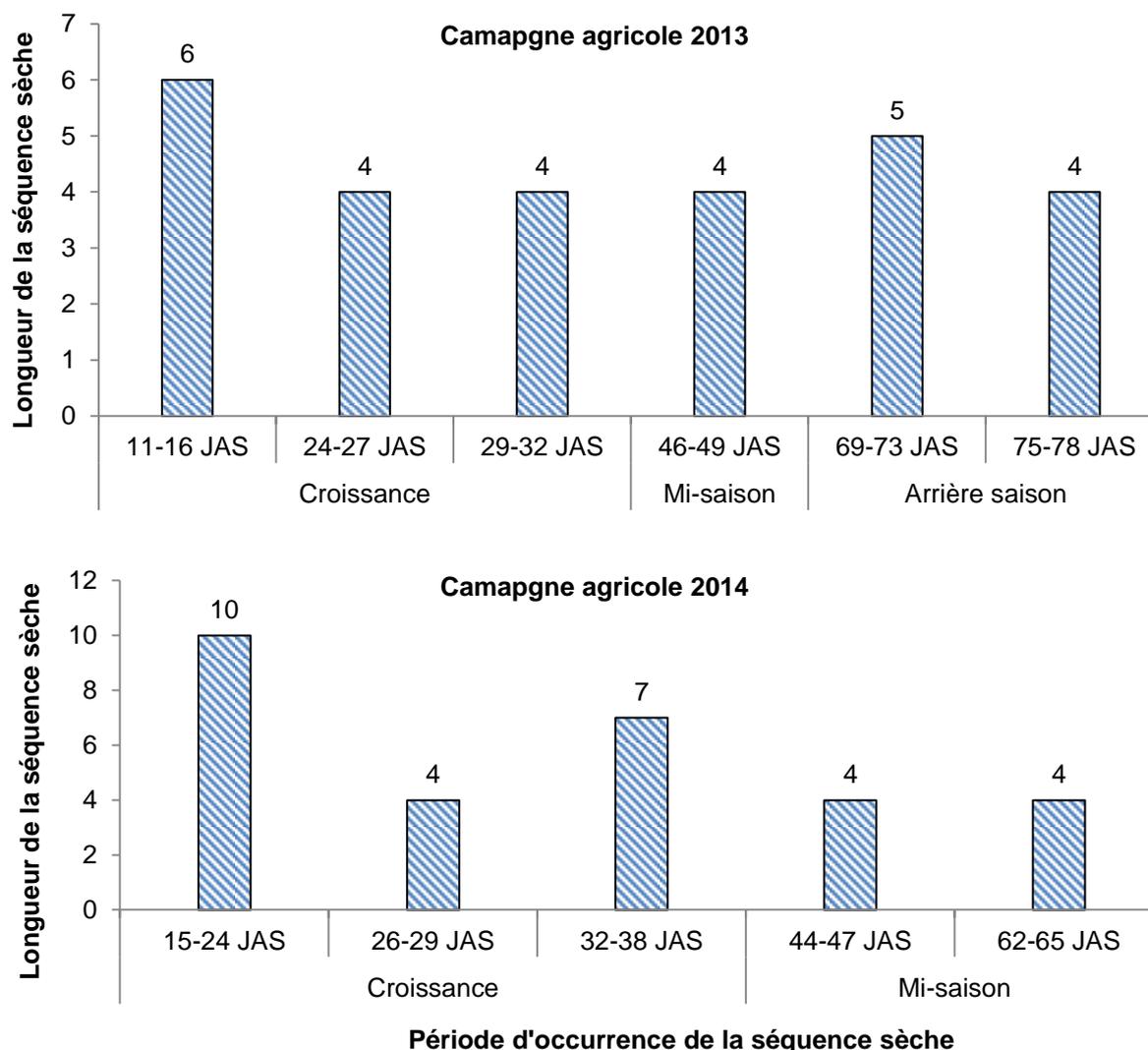


Figure 5-12 : Séquences sèches supérieures à trois jours et les périodes d'occurrence

Au cours de la phase de reproduction du maïs, les plus longues séquences sèches étaient de quatre jours en 2013. En 2014, la plus longue séquence sèche était de 10 jours et est survenue pendant la phase végétative entre le 15^{ème} et le 24^{ème} JAS. La séquence sèche de 7 jours a eu lieu à deux reprises: la première lors de la phase végétative (32-38 JAS) et la deuxième lors de la phase de remplissage des grains et la maturation (62-65 JAS et 66-68 JAS). Ainsi, l'irrigation de complément appliquée le 58^{ème} JAS en 2014 a permis d'atténuer l'effet de sept jours de poche de sécheresse.

Au total, les irrigations complémentaires appliquées ont montré une augmentation du stock d'eau du sol quelle que soit l'année et les traitements. L'augmentation est meilleure avec une dose d'irrigation d'au moins égale à 40 mm. Aucune poche de sécheresse de plus de 7 jours n'a été enregistrée au cours de la phase de reproduction du maïs. Ainsi, sur la base de l'analyse des stocks d'eau dans le sol, les scénarii d'irrigation de complément T1 et T2 valent autant que le scénario T3.

5.2.4.4. Evolution temporelle de la pression matricielle et évaluation du drainage sous la zone racinaire du maïs

❖ Pression de l'eau dans la zone racinaire du maïs

La variation temporelle de la pression de l'eau dans la zone densément colonisée par les racines du maïs est présentée à la **Figure 5-13**.

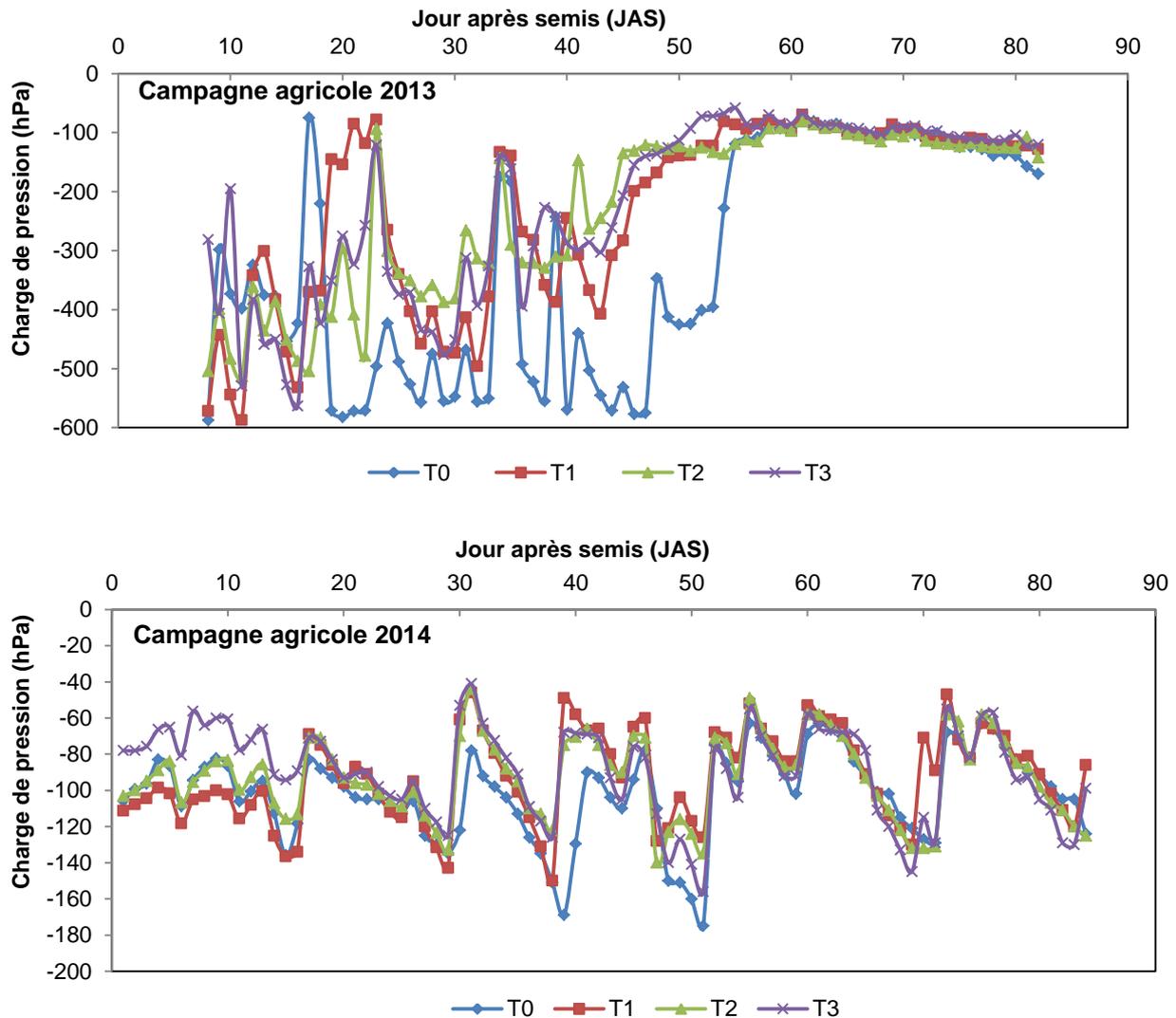


Figure 5-13 : Evolution de la charge de pression en 2013 et 2014

L'analyse montre que les charges de pression ont été globalement plus importantes durant la campagne agricole de 2013 que celles de 2014. Cependant, la pression de l'eau n'a pas passé en dessous de la barre des -600 hPa durant ces deux campagnes agricoles. De même durant la période de reproduction (40^{ème} – 65^{ème} JAS), les pressions de charge ne sont pas tombées en dessous de -400 hPa sur les parcelles sous irrigation de complément contrairement à celles en régime pluvial où des pics allant jusqu'à environ -580 hPa ont été observés. Ce qui stipule une condition hydrique favorable à l'alimentation en eau du maïs sur cette période dans les parcelles sous irrigation de complément. En 2014, l'ensemble des

parcelles a présenté une évolution semblable de la charge de pression variant entre -40 et -200 hPa. Cette situation émane du fait que les raies ont été butées. Ce qui favorise l'augmentation du temps de séjour de l'eau dans la parcelle et par surcroît une amélioration du stock en eau du sol.

❖ *Drainage à 80 cm de profondeur*

Le **Tableau 5-2** résume les quantités d'eau drainée à 80 cm de profondeur sous les différents traitements hydriques. Les courbes de conductivité hydraulique établies pour la détermination du drainage se trouvent en **annexe 4** (section 4.2).

L'analyse du **Tableau 5-2** montre que le drainage a été plus important durant la mi-saison correspondant au stade d'apport des irrigations d'appoint. La quantité totale d'eau drainée reste faible en 2013, mais plus élevée en 2014. Ce résultat est en corrélation avec l'augmentation du stock d'eau en 2014 par rapport à 2013 et a montré le rôle des sillons bloqués dans la gestion de l'eau pour favoriser l'infiltration. L'eau évacuée sous la zone racinaire du maïs en 2014 est significativement différente de celle observée sous T0 au seuil de 5% comme le montre le **Tableau 5-2**. La quantité d'eau perdue par drainage sous le traitement pluvial T0 a été de $0,5 \pm 0,2 \text{ mm.j}^{-1}$ contre une moyenne de $1,8 \pm 1,7 \text{ mm.j}^{-1}$ pour les traitements hydriques sous irrigation de complément (T1, T2 et T3).

Tableau 5-2 : Quantités d'eau drainée (mm) à 80 cm de profondeur en fonction des traitements hydriques à la fin des campagnes agricoles de 2013 et 2014

Stade phénologique	Campagne agricole 2013				Campagne agricole 2014			
	T0	T1	T2	T3	T0	T1	T2	T3
Initial	0	0	0	2	6	5	13	10
Croissance	1	1	1	13	16	11	15	18
Mi-saison	5	5	6	15	13	60	84	80
Arrière-saison	2	3	6	6	8	48	40	61
Total	8 ^a	9 ^a	13 ^a	36 ^b	43 ^c	124 ^d	152 ^d	169 ^d

Note : Les valeurs affectées d'exposants différents sont significatifs au seuil de probabilité de 5% et celles qui portent des exposants identiques sont non significatives pour la même campagne agricole.

5.2.4.5. Consommation en eau et rendement en grain du maïs

Le **Tableau 5-3** résume la consommation en eau du maïs et les rendements en grain au cours de la période du 01 juillet au 18 septembre 2013 et du 23 juin au 10 septembre 2014. Le tableau montre que l'évapotranspiration réelle (ETR) a été plus élevée dans les unités expérimentales sous irrigation de complément.

En effet, en 2013 les scénarii d'irrigation de complément T1, T2 et T3 ont reçu respectivement 96, 83 et 128 mm d'eau complémentaire. Ce qui était à la base de la plus grande consommation d'eau reflétant ainsi un certain confort hydrique dans ces unités expérimentales. Les lames d'eau supplémentaires évapotranspirées par rapport à T0 en 2014 résultaient de l'irrigation de complément qui était de 96 mm pour T1, 95 mm pour T2 et

145 mm pour T3. La consommation moyenne journalière en conditions pluviales strictes était respectivement de 4,2 mm et 4,9 mm en 2013 et 2014 contre une moyenne de 5,5 mm et 5,8 mm en irrigation de complément. La consommation en eau du maïs par jour sous les scénarii T2 et T3 varie de 5,4 mm à 5,6 mm contre 5,8 mm à 6,1 mm sous le scénario T3. Ce résultat confirme que deux irrigations de complément ciblant la mi- saison (la floraison et le remplissage des grains) valaient autant que trois (floraison, la pollinisation et le remplissage des grains).

Tableau 5-3: Evapotranspiration réelle (ETR) et rendement en grain réel (Yact) du maïs sur chaque unité expérimentale en 2012 et 2013

	T0	T1	T2	T3
Campagne agricole 2013				
ETR (mm)	332	427	438	464
Yact (kg.ha ⁻¹)	3600 ^a	4400 ^a	4400 ^a	4600 ^a
Campagne agricole 2014				
ETR (mm)	390	446	457	489
Yact (kg.ha ⁻¹)	3800 ^b	4200 ^b	4700 ^b	4800 ^b

Note : Pour la même campagne agricole, les rendements affectés d'exposants différents sont significatifs au seuil de 5% et ceux affectés d'exposants identiques sont non significatifs.

Les rendements les plus élevés, notés dans les parcelles sous irrigation de complément étaient dus au confort hydrique dont ont bénéficié les plantes sur T1, T2 et T3 par rapport à T0. Cependant, les rendements en 2013 et 2014 avec deux ou trois irrigations de complément étaient non significativement différents (p -value > 0,05) de ceux obtenus en régime pluvial comme le confirme l'analyse de variance en **annexe 6** (section 6.3. et 6.4.). Le coefficient de variation a oscillé entre 12 et 22% sur les parcelles sous irrigation de complément contre 44% en régime contre. C'est cette variabilité qui serait à l'origine des rendements non significatifs. A cela, il faut également ajouter l'effet tampon du choix de la période favorable de semis. L'efficacité d'utilisation de l'eau a été estimée à 1,0 kg.m⁻³ en moyenne quel que soit le traitement appliqué. Néanmoins, l'irrigation de complément a permis d'obtenir un gain variant entre 400 et 1000 kg.ha⁻¹. La contribution moyenne de l'irrigation de complément à l'augmentation du rendement était de 21% en 2013 et 2014. La contribution moyenne de T3 était respectivement de 24 et 26% en 2013 et 2014 contre 18 et 10% pour T1, 18 et 19% pour T2. Ainsi, la floraison et le remplissage des grains étaient les stades de développement les plus importants pour appliquer les apports d'eau complémentaire en zone sahélienne Burkinabè.

Au total, l'analyse des transferts d'eau et les rendements obtenus témoignent de la nécessité de l'irrigation de complément en maïsiculture dans le Sahel Burkinabè pour augmenter et stabiliser la production agricole pluviale. Ces résultats ont montré que trois irrigations complémentaires valent autant que deux irrigations pratiquées au début et à mi-parcours de la mi- saison. Ce qui montre que le scénario d'irrigation de complément ciblant le début de la

floraison et celui de remplissage de grain (c'est-à-dire T2) est le mieux adapté au Sahel Burkinabè. Cependant, le facteur le plus important dans le scénario d'irrigation de complément adopté est la dose à appliquer qui dépend des caractéristiques pédologiques du sol en présence. Autrement dit un sol léger et un sol moyen réagissent différemment pour la même lame d'eau. Une optimisation de la stratégie d'irrigation de complément s'impose donc surtout dans une zone aride comme le Sahel Burkinabè où l'eau est une ressource rare. Mais avant d'isoler cette stratégie, une analyse de l'efficacité du BCER à atténuer les effets des séquences sèches en agriculture pluviale sous d'autres conditions pluviométriques s'avère indispensable.

5.2.4.6. Bilan d'eau sur le BCER

Etant donné que la modélisation du climat futur demeure un problème difficilement maîtrisable, l'étude de l'évolution historique du climat peut constituer un élément clé dans l'établissement d'outil d'aide à la gestion. Ainsi, afin d'étudier l'efficacité du BCER à atténuer les effets d'un déficit pluviométrique donné, ce dernier a été placé dans les conditions pluviométriques historiques de la période 1960-2012 sous les caractéristiques hydrauliques actuelles du BCER et de son impluvium.

❖ Fluctuation de l'eau disponible dans le BCER

L'évolution temporelle de la lame d'eau dans le BCER durant les campagnes de 2013 et 2014 est reportée à la **Figure 5-14**. Rappelons que ces lames d'eau ont été déterminées pour une superficie de 2000 m².

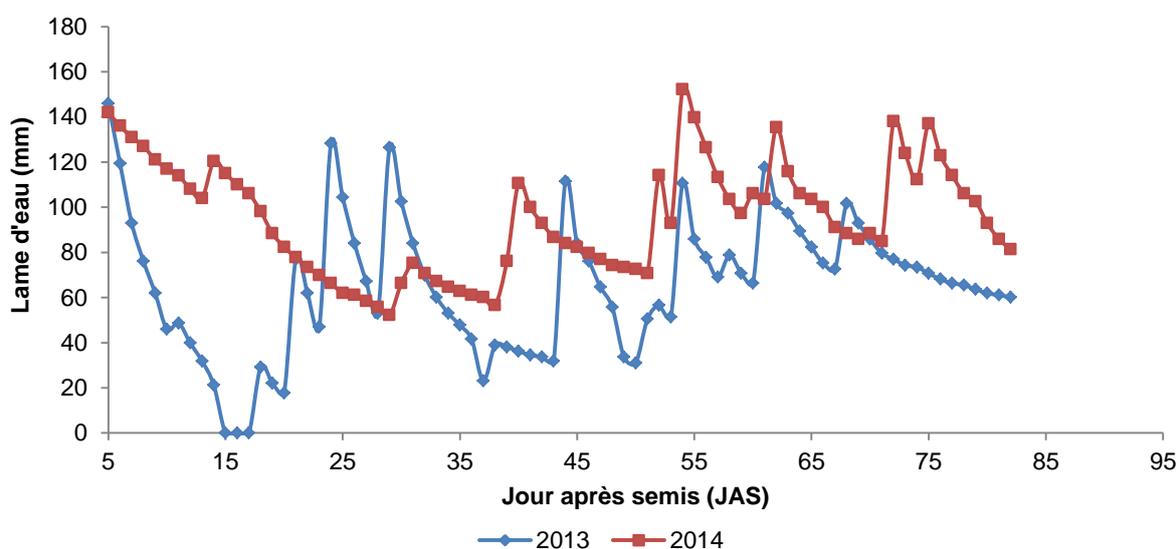


Figure 5-14: Evolution de l'eau disponible dans le BCER en 2013 et 2014

La lame d'eau disponible dans le bassin a varié entre 0 et 145 mm quel que soit la campagne agricole. Les variations ont été plus importantes durant l'année 2013 alors qu'en 2014 elles ont été faibles pour deux dates consécutives. Cette situation s'explique par le fait

qu'en 2013 la texture initiale du sol à la surface du fond du bassin favorise plus l'infiltration. De même, les pertes d'eau par évaporation ont été plus importantes en 2013 (294,6 mm) qu'en 2014 (259 mm). La conductivité hydraulique à saturation a été estimée à 20 cm.j⁻¹ en 2013. En 2014, cette conductivité a chuté à cause du dépôt de particules fines (limons) au fond du bassin durant l'année 2013.

Les caractéristiques texturales initiales de la surface du sol au fond du bassin en 2014 sont donc celles obtenues à la fin de la campagne agricole de 2013. Ce colmatage du fond du bassin réduit considérablement l'infiltration de l'eau dans ces structures de stockage d'eau et de réalimentation artificielle des nappes.

En effet, les pertes d'eau par infiltration sont plus importantes dans un BCER à son premier remplissage. Au bout de quelque temps après le remplissage, l'eau tend à modifier la structure du sol, dont les pores se colmatent sous l'effet de la matière organique et des particules limoneuses qui se déposent au fond du BCER. Ainsi la perméabilité du sol et les pertes par infiltration diminuent. L'importance des infiltrations verticales dépend donc de la texture et de la structure du sol du fond du BCER.

❖ *Les pertes d'eau par infiltration et évaporation*

Les pertes d'eau sur le BCER durant les campagnes agricoles de 2013 et 2014 sont portées à la **Figure 5-15**.

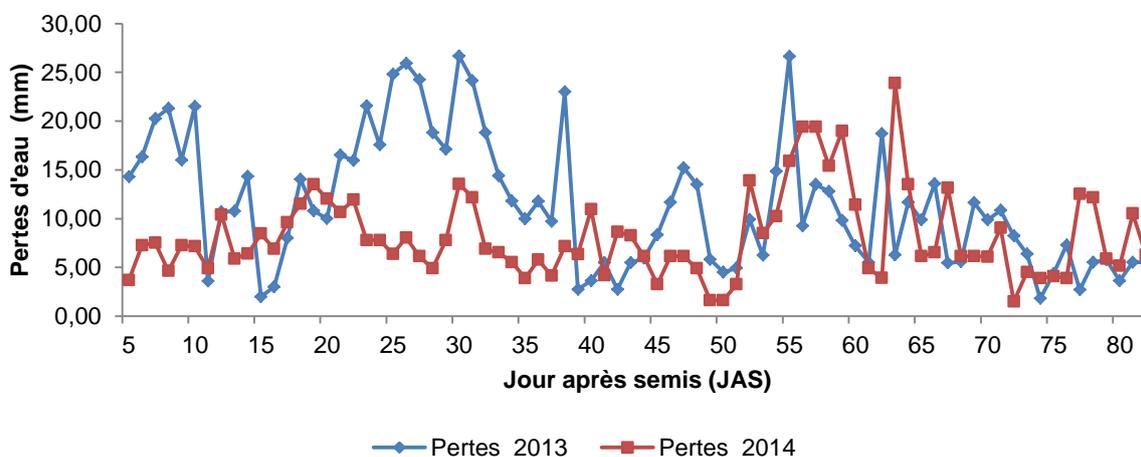


Figure 5-15 : Evolution des pertes par infiltration et évaporation d'eau sur le BCER

L'analyse de la **Figure 5-15** montre que les pertes d'eau par infiltration et évaporation ont été plus importantes en 2013. Elle a varié de 1,8 mm à 26,7 mm en 2013 contre 1,5 à 24 mm en 2014. L'infiltration dans le BCER représentait en moyenne 58% des pertes totales en 2013 contre 56% en 2014. L'infiltration moyenne journalière est de 7,7 mm en 2013 pour 4,9 mm en 2014 avec un écart type respectif de 6,2 et 3,8 mm. Les pertes d'eau en 2013 sont

significativement différentes de celles enregistrées en 2014 (p -value = $0,002 < 0,05$) révélant ainsi l'effet positif du colmatage du sol dans ces structures de stockage d'eau.

5.2.4.7. Probabilité de remplissage du BCER et optimisation de la superficie irrigable en maïs à partir des BCER

❖ **Calage des entrées et pertes d'eau dans le BCER**

La limnimétrie du BCER durant les deux campagnes agricoles 2013 et 2014 a permis d'évaluer la proportion p_e de la pluie qui alimente en eau le BCER et celle perdue par infiltration et évaporation (p_s). Les résultats décadaires sont consignés dans le **Tableau 5-4**.

Tableau 5-4 : Evaluation par décade des entrées p_e (%) et pertes p_s (%) d'eau dans le BCER

Décades	Juin_3	Juil_1	Juil_2	Juil_3	Août_1	Août_2	Août_3	Sept_1	Sept_2
Entrées p_e	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Pertes p_s	6,2	19,3	24,3	21,9	19,5	23,0	14,1	14,1	8,0

Les entrées moyennes d'eau par ruissellement durant les deux campagnes agricoles proviennent d'une aire de captage de 2,4 ha obtenue par levé topographique comme le montre la **Figure 5-16**. Ces entrées d'eau ont été obtenues sur le BCER témoin (**Figure 5-12**) à partir du volume pluviométrique enregistré sur l'aire de captage et les données limnimétriques relevées avant et après chaque événement pluvieux. Cette constante de 30% représente en fait la proportion moyenne des entrées d'eau déterminées durant toute la période de mesure après chaque événement pluvieux.

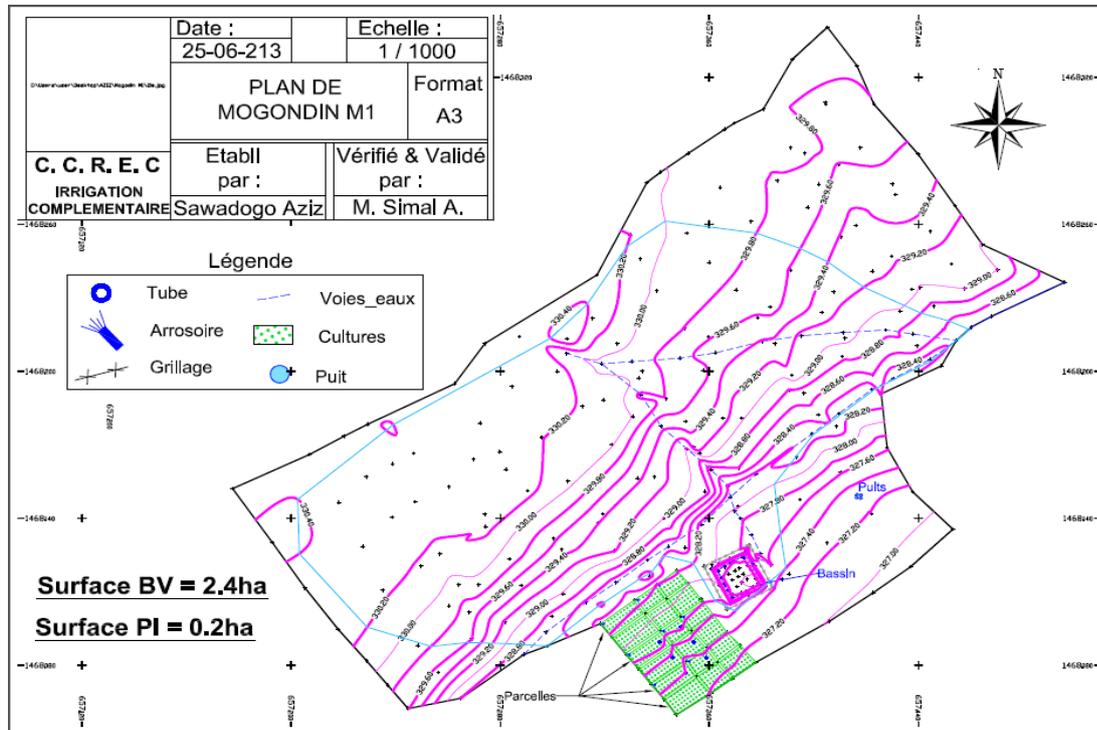


Figure 5-16 : Levé topographique de la parcelle d'essai (PI) et de l'impluvium (BV)

L'aire de l'impluvium qui contribue réellement à l'alimentation en eau du BCER d'étude est de 0,39 ha soit environ 17% de l'aire totale de captage. Cette aire est caractérisée par des sols encroûtés générant d'important ruissellement. Le reste de l'aire totale de captage est constitué de zones cultivées sur lesquelles le taux de ruissellement est très faible. La pente moyenne était de 1%.

Les pertes moyennes d'eau par décade sur le BCER ont été obtenues à partir des pertes journalières (**Figure 5-14**) et de la lame d'eau initialement disponible ce jour dans le BCER d'étude. Les valeurs de p_s proviennent des pertes moyennes décadaires et des lames moyennes d'eau disponibles par décade durant les campagnes de 2013 et de 2014.

❖ **Probabilité de remplissage du BCER**

Sous les conditions des proportions d'entrée p_e (30%) et perte moyenne $p_{s\text{ moy}}$ (17%) déterminées in situ, les probabilités d'alimentation en eau du BCER ont été déterminées sous les trois scénarii de remplissage isolés dans la section 4.5.4. du **chapitre 4**. Les résultats sont représentés sur la **Figure 5-17**.

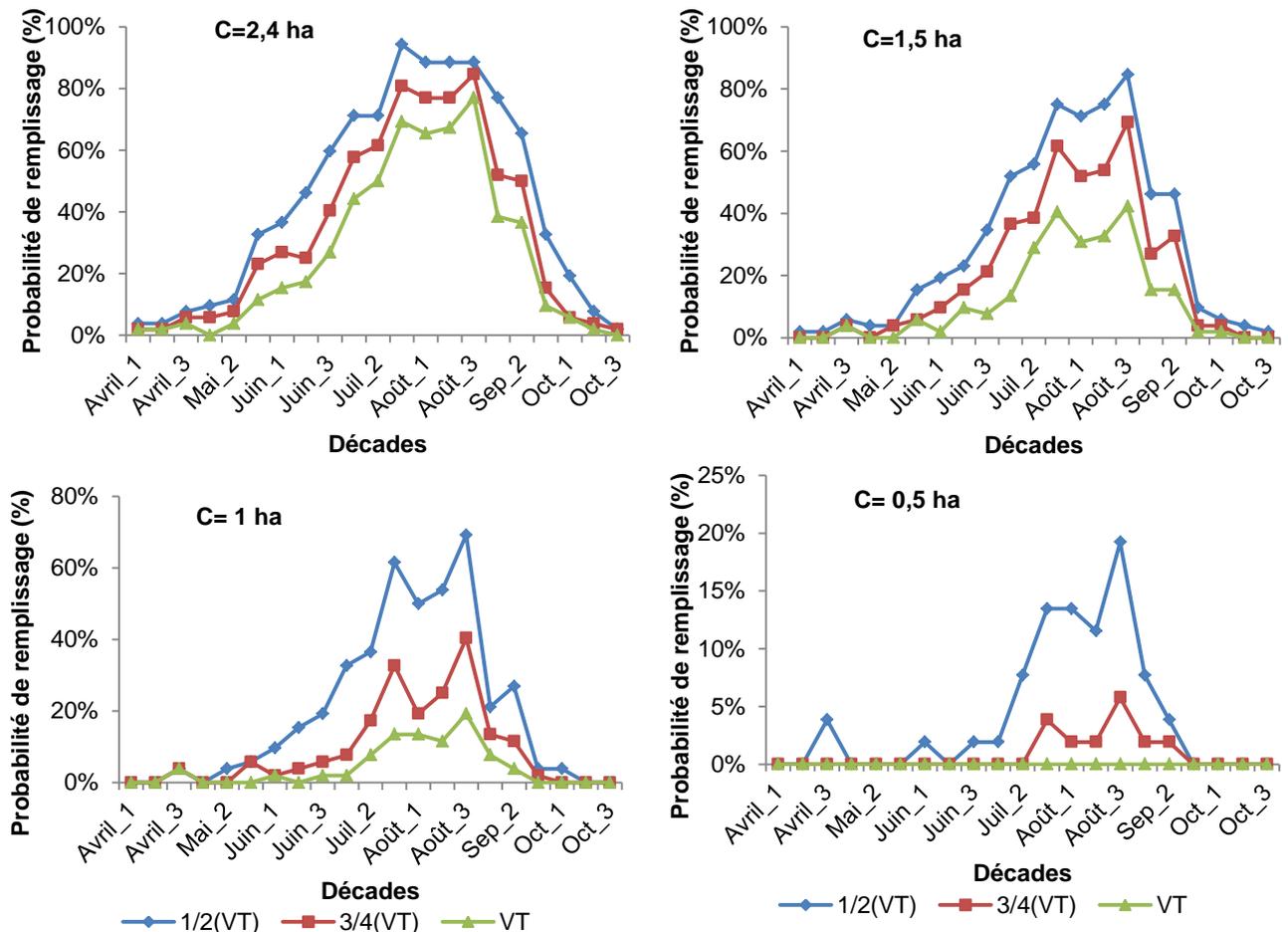


Figure 5-17 : Probabilités d'alimentation en eau du BCER sous trois scénarii de remplissage et pour différentes aires de captage

L'analyse montre que pour l'impluvium actuel de 2,4 ha levé dans le cadre de cette étude, le BCER placé dans les conditions pluviométriques de la période 1960-2012 a au moins 50% de chance d'être rempli d'au moins de moitié (soit 150 m³) sur la période allant de la troisième décennie de juin (Juin_3) à la deuxième de septembre (Sep_2). Une diminution d'un hectare de l'aire de captage permet de remplir de moitié le BCER cinq à huit années sur dix sur la période allant de la première décennie de juillet (Juil_1) à la troisième décennie d'août (Août_3). Le scénario de remplissage au trois quart du BCER (3/4VT) demeure un défi sous cette aire de captage de 1,5 ha en dehors de la période couvrant Juil_3 à Août_3 où les probabilités varient de 52 à 69%. Pour un impluvium d'un hectare, le remplissage à moitié du BCER s'effectue cinq à sept années sur dix sur la même période que précédemment alors que pour un impluvium de 0,5 ha, la probabilité de remplissage sous les trois scénarii reste inférieure à 20%. Ainsi, l'impluvium d'un hectare semble être l'aire de captage minimale nécessaire sous nos hypothèses (coefficient de remplissage = 30% et pertes d'eau moyenne du BCER = 17%) pour remplir d'au moins de moitié le BCER deux années sur dix. Cependant, cette aire de captage ne constitue pas pour autant la limite inférieure de l'impluvium puisque le BCER n'a jamais été vide durant la période allant de la première décennie de juillet à celle de septembre. Dans ce sens, l'impluvium de 0,5 ha peut s'avérer utile pour l'implémentation de la technologie.

Au total, la probabilité d'alimentation en eau du BCER sous les trois scénarii de remplissage varie en fonction de la taille de l'aire de captage. Cette probabilité a été plus importante durant les mois les plus pluvieux (juillet et août) et varie de 33 à 94% pour le scénario de remplissage à moitié (150 m³) sous une aire de captage d'au moins un hectare. Il en résulte que, sous le scénario de semis calé dans la troisième décennie de juin, les besoins en eau du maïs peuvent être satisfaits par décennie durant les mois de juillet et d'août trois à neuf années sur dix. Cependant, cette analyse intègre l'effet couplé des campagnes humides et sèches de la période 1960-2012. Ainsi, pour étayer notre conclusion, une analyse des campagnes sèches a été faite dans les sections suivantes de ce chapitre afin d'analyser l'efficacité du BCER à l'atténuation des séquences sèches en agriculture pluviale.

❖ ***Indice de satisfaction en eau du maïs et efficacité du BCER dans un contexte de déficit pluviométrique prononcé***

Le bilan d'eau global dans le système constitué par le BCER et la parcelle à irriguer est effectué sur huit décades correspondant au cycle de la variété de maïs *Barka*. Il a été supposé qu'au début de la campagne agricole, le BCER est rempli au 3/4 de sa capacité totale dans la troisième décennie de juin. Le levé topographique de l'aire de captage a permis le calage de sa superficie évaluée à C=2,4 ha. La superficie de base cultivée en maïs a été fixée à A=0,2 ha. Les résultats pour la campagne agricole sèche (voir **Tableau 5-5**) dans le

cadre de cette étude sont renseignés dans le **Tableau 5-5**. L'analyse montre à priori que les besoins en eau du *Barka* sont couverts sous les hypothèses suscitées même en année de faible pluviométrie. L'indice de satisfaction en eau du *Barka* n'est pas tombé en dessous de la valeur de 100%. Le semis réalisé dans la décade convenable (troisième décade de juin) est à l'origine de cette situation. Ce scénario de semis a permis de faire coïncider les phases les plus sensibles du maïs aux périodes les plus humides de la campagne agricole (c'est-à-dire les décades du mois d'août).

Cependant, cette efficacité dépend du niveau de remplissage du BCER au semis qui a été fixé au trois quart de sa capacité totale. Ainsi, pour s'affranchir de cette hypothèse, une analyse de la contribution du BCER a été faite. A cet effet, l'évolution du volume d'eau disponible dans le BCER ainsi que les demandes en eau d'irrigation de complément ont été simulées sur la base des conditions pluviométriques de la récente campagne agricole 2011-2012 reconnue comme campagne agricole exceptionnellement déficitaire au Burkina Faso. Cette campagne agricole a enregistré une pluie annuelle de 378 mm dont 33% dans la deuxième décade du mois d'août. Les résultats obtenus sous l'impluvium d'un hectare sont portés à la **Figure 5-18**. Les résultats montrent que l'utilisation du BCER en agriculture pluviale aurait permis d'atténuer les effets du déficit pluviométrique sur la production du maïs durant cette campagne agricole.

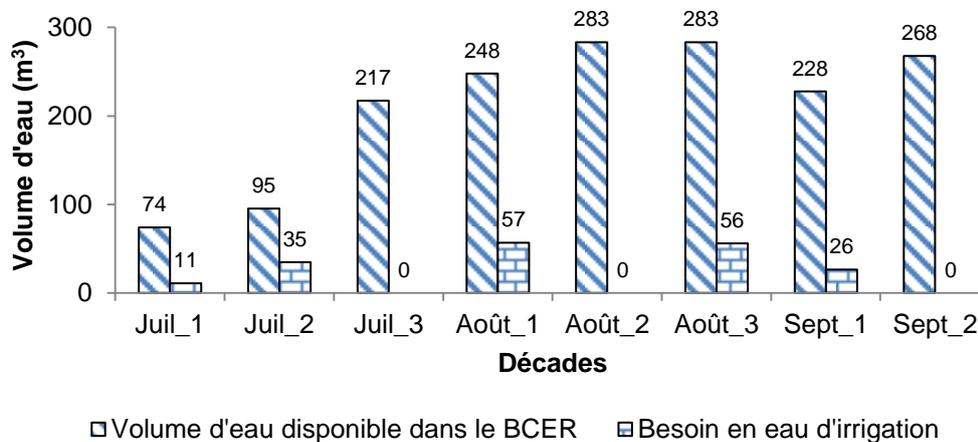


Figure 5-18 : Simulation du volume d'eau disponible dans le BCER et des besoins en eau d'irrigation de complément sur la campagne agricole 2011-2012

Tableau 5-5 : Bilan d'eau global et calcul de l'indice de satisfaction en eau du *Barka* pour une campagne sèche

Aire de captage C = 2,4 ha Besoin total en eau du <i>Barka</i> : TWR = 285 mm Remplissage du BCER au semis : ¼ volume total Emblavure : A = 0,2ha									
Décades	Formule	Juil_1	Juil_2	Juil_3	Août_1	Août_2	Août_3	Sept_1	Sept_2
Volume disponible (m ³)	V_d	283,0	283,0	283,0	283,0	283,0	283,0	283,0	283,0
Pertes (m ³)	$V_p = p_s \times V_d$	54,6	68,8	62,0	55,2	65,1	39,9	39,9	39,9
Pluie (mm)	P	31,7	39,6	50,2	52,0	55,1	57,0	28,2	29,7
Efficiéce de la pluie (mm)	$P_e = 0,8 \times P$	22,2	27,7	35,1	36,4	38,6	39,9	19,8	20,8
ET _o (mm)	ET_o	49,5	49,0	50,9	41,9	45,4	51,7	45,1	50,3
Coefficient cultural	k_c	0,46	0,58	0,69	1,11	1,11	1,11	0,50	0,35
Besoin en eau du <i>Barka</i> (mm)	$ET_c = k_c \times ET_o$	22,7	28,2	35,2	46,5	50,4	57,4	22,5	17,6
Besoin en irrigation (mm)	$I = ET_c - P_e$	0,5	0,4	0,1	10,1	11,8	17,5	2,8	0,0
Volume d'eau en irrigation (m ³)	$I_v = 10 \times I \times A$	1,0	0,8	0,2	20,3	23,6	34,9	5,6	0,0
Irrigation appliquée (mm)	I_a	0,5	0,4	0,1	10,1	11,8	17,5	2,8	0,0
Surplus/Déficit (mm)	$S/D = ET_c - P_e$	-0,5	-0,4	-0,1	-10,1	-11,8	-17,5	-2,8	3,2
Volume restant (m ³)	$V_r = V_d - V_p - I_v$	227,4	213,4	220,8	207,5	194,3	208,2	237,5	243,1
Déficit final (mm)	Equation (7-17)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Indice de satisfaction I_c	Equation (7-16)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

❖ Détermination de l'emblavure optimale

Les résultats de la simulation de l'emblavure irrigable sous l'impluvium de 0,5 ha sont portés sur la **Figure 5-19**. Pour ces résultats, la décade de semis calée dans la première section de cette partie a été appliquée. Les résultats montrent que l'indice de satisfaction reste égal à 100% pour une emblavure de 0,20 ha de maïs. La superficie irrigable de 1 ha reste un défi difficilement surmontable avec la capacité du BCER. Ainsi, les emblavures de 0,2 ha et 0,5 ha constituent respectivement les superficies optimale et maximale irrigable à partir du BCER sous une aire de captage de superficie minimale 0,5 ha. Ce qui représente un rapport surface cultivée/surface impluvium variant entre 0,4 et 1. Le ratio surface BCER/surface impluvium est égal à 0,05. Rappelons que l'aire de l'impluvium nécessaire pour la collecte des eaux de ruissellement se situe généralement en dehors de la parcelle cultivée et que c'est seulement 12% de la parcelle disponible qui est allouée au BCER.

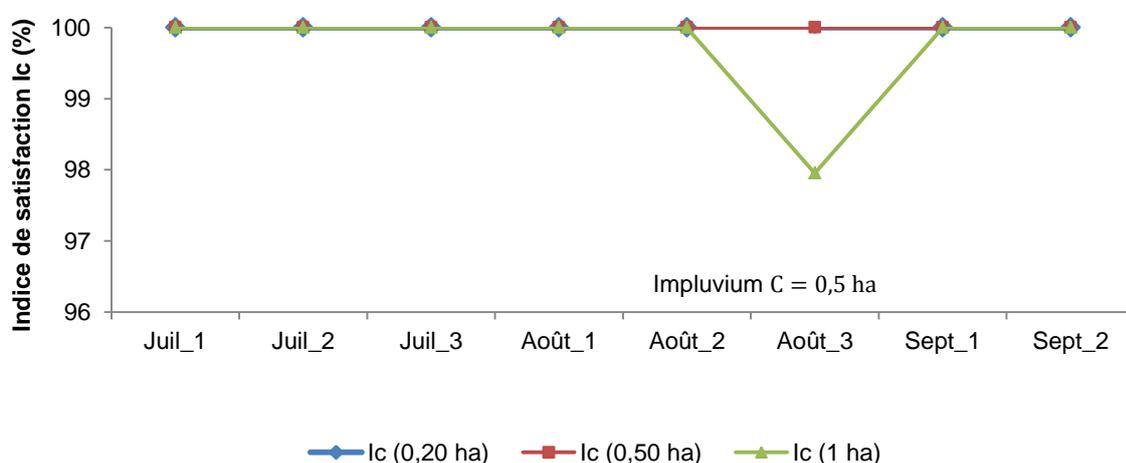


Figure 5-19 : Variation de l'indice de satisfaction du maïs *Barka* en fonction de l'emblavure et de l'aire de captage des eaux de ruissellement

5.2.5. Evaluation socio-économique de la pratique de l'irrigation de complément

5.2.5.1. Contribution des BCER à la satisfaction des besoins céréaliers

La contribution de la pratique de l'irrigation d'appoint à la satisfaction des besoins céréaliers annuels à partir du bassin d'étude est représentée à la **Figure.5-20**. L'analyse montre que durant les deux campagnes agricoles 2013 et 2014, la pratique de l'irrigation de complément a permis de nourrir 22 à 25 personnes par an contre 19 à 20 personnes lorsque l'irrigation n'est pas pratiquée. Ainsi, l'irrigation de complément a permis de nourrir 3 à 5 personnes additionnelles par an soit environ 2 personnes en moyenne par an pour une superficie de 0,20 ha de maïs. Cet écart relativement faible émane du choix de la date de semis qui correspondait à la période favorable. Ce qui a priori permet de valider expérimentalement la date favorable de semis déterminée durant l'étude pré-expérimentale.

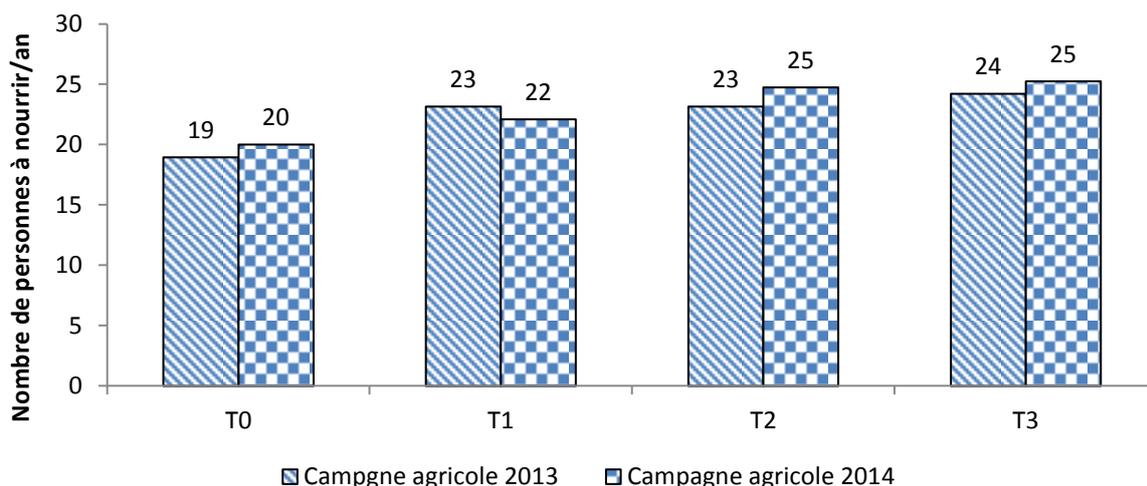


Figure 5-20 : Evolution comparée de la contribution au besoin céréalier des ménages

5.2.5.2. *Evaluation économique de la pratique de l'irrigation de complément*

Rappelons que les BCER ont été construits grâce aux membres actifs des exploitations agricoles à travers un travail communautaire. Le matériel utilisé pour la construction des BCER est composé de pioches, barre à mine, pelle, brouette, gravillon moellon et du grillage. Le coût total d'acquisition du matériel d'exhaure a été évalué à 139 476 FCFA.

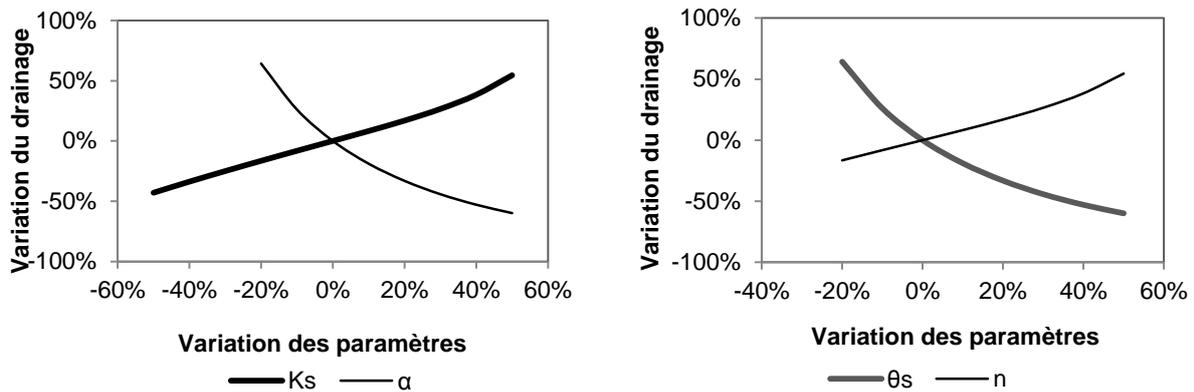
En supposant la main d'œuvre familiale comme une main d'œuvre salariée, le coût de construction du BCER d'étude est égal à 922 900 FCFA. Ce coût équivaut à 940 900 avec l'addition du coût d'opportunité de la terre et l'entretien annuel du BCER. La durée de vie du BCER d'étude a été fixée à 15 années et celle du matériel d'exhaure à 5 années. Sur cette base, la VAN calculée était positive pour un taux d'actualisation de 5 à 15%. Le TIR a été estimé à 16% environ pour un délai de récupération de 7 années. Ainsi, l'irrigation de complément à partir du BCER d'étude constitue une innovation agricole viable et adoptable pour les agriculteurs car la VAN est positive et le TIR dépasse le taux d'intérêt fixé à 12,5% par les banques.

5.3. Etude post-expérimentale

Avant de construire la stratégie d'irrigation d'appoint en maïsiculture et d'analyser la contribution potentielle des BCER partiellement imperméabilisés à la recharge de la nappe sous-jacente, l'efficacité de HYDRUS à reproduire la réalité a été d'abord étudiée. Cette mesure de la fidélité a été faite à travers un jeu de simulation et de validation. Ce qui a permis de spatialiser la contribution des BCER à l'atténuation des effets du déficit pluviométrique en zone sahélienne du Burkina Faso. Cette étude post-expérimentale rapporte les résultats de la modélisation des transferts sous HYDRUS 2D/3D.

5.3.1. Analyse de sensibilité du modèle

L'analyse de sensibilité du modèle a consisté à incrémenter ou décrémenter de 10% les paramètres hydrauliques du sol issus du calage et d'étudier son impact sur le drainage cumulé à 80 cm de profondeur. Cette profondeur a été retenue car elle représente la limite inférieure de l'enracinement maximale de la culture pratiquée. Les résultats pour les paramètres α , K_s , n et θ_s sont reportés sur la **Figure 5-21**.



Note : K_s = conductivité hydraulique à saturation, α = inverse de la pression d'entrée d'air, θ_s = teneur en eau à saturation, n = indice de distribution de la taille des pores.

Figure 5-21 : Analyse de sensibilité de différents paramètres hydrauliques

L'analyse montre que le drainage simulé augmente avec les paramètres K_s et n mais diminue avec les paramètres α et θ_s . Cette étude de sensibilité montre que le drainage dépend fortement des paramètres α et n intervenant respectivement dans le calcul de K_s à travers la fonction de conductivité hydraulique et θ_s à travers la courbe de rétention en eau du sol.

5.3.2. Evaluation et validation du code HYDRUS 2D/3D

5.3.2.1. Comparaison des humidités simulées et observées sur la parcelle d'essai

L'analyse graphique des résultats de la **Figure 5-22** montre une concordance satisfaisante entre les teneurs moyennes en eau simulées et celles observées dans la couche 30-100 cm durant les campagnes agricoles de 2013 et 2014 pour deux traitements hydriques. Les résultats pour la couche de surface 0-30 cm se trouvent en **annexe 7**.

Le processus de redistribution de l'eau en profondeur est assez bien simulé même si des séquences de sous-estimation de la teneur en eau ont été observées sur les deux groupes de parcelles (T0 et T3) aussi bien en 2013 qu'en 2014. Cette sous-estimation peut résulter de la discrétisation temporelle du phénomène d'infiltration effectuée pour chaque évènement pluvieux. Ceci du fait que la spécificité de la dynamique de l'infiltration de l'eau en cas de

grandes averses a été partiellement modélisée dans cette étude. Néanmoins les écarts entre teneur en eau simulée et teneur en eau observée ne sont pas significativement différents comme le montre le **Tableau 5-6** (RMSE et NSE respectivement proche de zéro et de l'unité, p-value > 0,5).

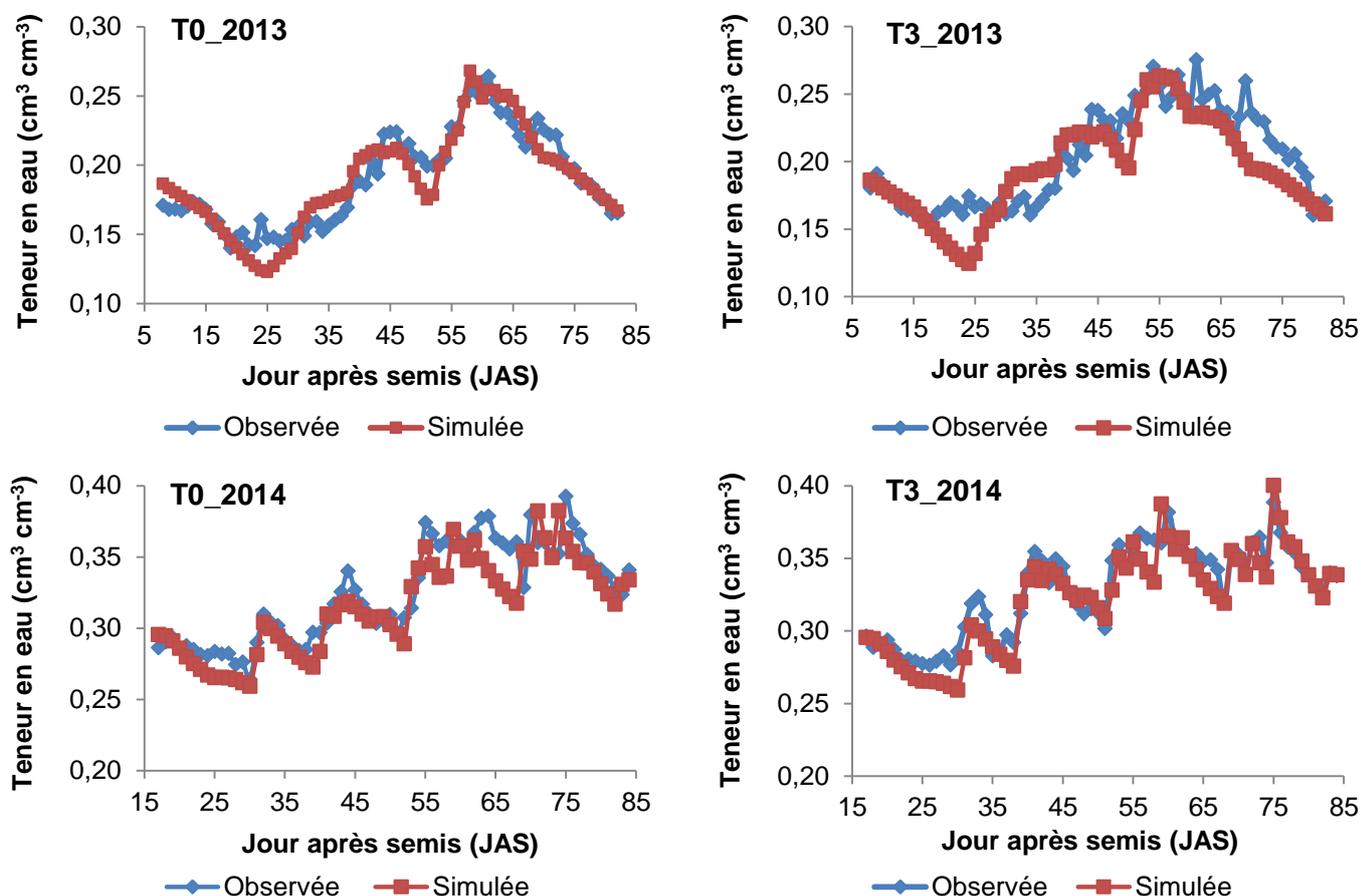


Figure 5-22 : Teneurs moyennes en eau (θ) observées et simulées en régime pluvial (T0) et en irrigation de complément (T3) dans la couche 30-100 cm en 2013 et 2014

Tableau 5-6: Statistiques d'évaluation du modèle (RMSE, NSE, RSR) et p-value du test t de Student (seuil de probabilité de 5%) pour l'évaluation de la significativité entre teneur en eau simulée et observée dans la couche 30-100 cm

Traitement	T0				T3			
	RMSE	NSE	RSR	p-value	RMSE	NSE	RSR	p-value
2013	0,01	0,90	0,39	0,82	0,02	0,99	0,60	0,14
2014	0,00	1,00	0,49	0,12	0,01	0,81	0,40	0,33

RMSE : racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); NSE : coefficient de Nash [-]; RSR : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne standardisée [-]

5.3.2.2. Efficacité du modèle à reproduire les teneurs en eau sous le BCER

Une comparaison de la teneur en eau mesurée sur un tube d'accès situé à 2 m du BCER à celle simulée sous HYDRUS a montré que le modèle reproduit assez bien les flux d'eau

jusqu'à 100 cm de profondeur mais a sous-estimé ces derniers en profondeur (**Figure 5-23**). Une différence significative (p -value < 0,5) a été observée entre les humidités mesurées et celles simulées en profondeur. Le coefficient de régression a été évalué à 0,7. Cependant, les teneurs en eau simulées sont tout de même satisfaisantes au vu de la complexité de l'étude des flux d'eau en milieu insaturé.

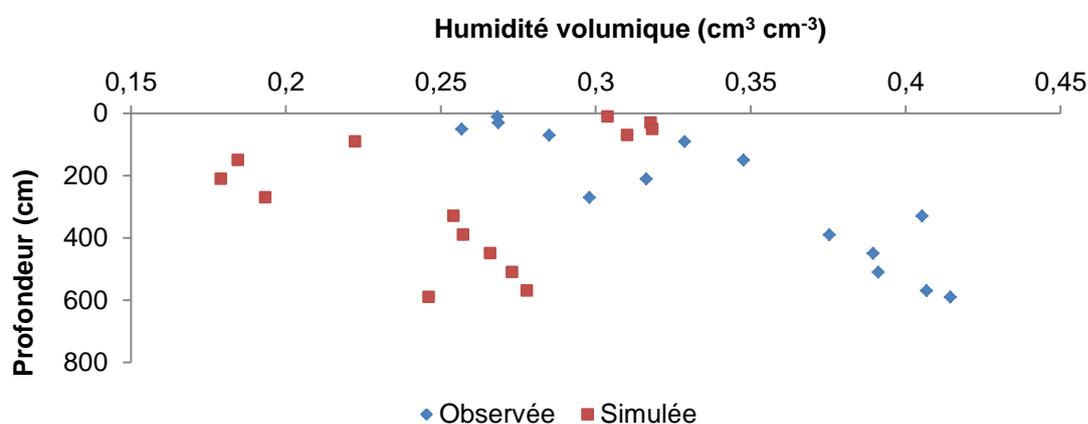


Figure 5-23: Teneur en eau observée et simulée sous le BCER au 45^{ème} JAS en 2014

La sous-estimation des flux d'eau en profondeur est due au fait que la courbe d'étalonnage utilisée ne prenait en compte que les 100 premiers centimètres du sol et n'a pas pu être établie en profondeur. Une partie de cette divergence peut également trouver son explication dans la difficulté du modèle à restituer les micro-variations dans le profil du sol. Aussi, les tubes d'accès installés se trouvaient en bas de pente où a été observée une stagnation temporaire de l'eau due aux déblais situés à 3 m en aval. Ce qui explique l'importance des humidités mesurées in situ par rapport à celles simulées.

5.3.3. Scénario d'irrigation de complément adapté au Sahel Burkinabè

La simulation des profils hydriques sous le code HYDRUS-2D/3D sur la base des propriétés hydrauliques du sol moyen du Sahel Burkinabè a montré des comportements hydriques différents selon le scénario de transfert d'eau (reconstitution, redistribution) et d'occurrence de pluie décadaire (**Figure 5-24a**).

Pour une séquence sèche de 10 jours succédant la reconstitution de la réserve totale en eau du sol, le profil traduit une diminution graduelle de l'humidité dans le temps jusqu'à 70 cm de profondeur où elle s'étale à $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Le tarissement de l'eau du sol atteint le seuil de 50% ($p = 0,5$) en 6 jours (J6) et celui de 60% en 8 jours (J8) dans la zone densément colonisée (0-50 cm) par les racines de maïs. Par contre 2 à 4 jours suffisent pour vider d'au moins de moitié l'eau utile du sol à 30 cm de profondeur.

Les résultats (**Figure 5-24b**) de la simulation des scénarii d'occurrence des cumuls de pluie décadaire (D2, D3 et D3) montrent une stabilisation de l'humidité volumique pour un cumul de pluie de 10 mm correspondant au scénario D2. Le scénario D3 correspondant à un cumul de 40 mm contribue à l'amélioration de l'humidité du sol mais la réserve utile du sol n'a pas été reconstituée. Quant au scénario D4 (cumul de pluie = 50 mm), l'humidité à la capacité au champ est atteinte dans les quatre jours suivant l'occurrence de l'événement et renforce ainsi l'efficacité des doses d'irrigation d'appoint appliquées durant la phase expérimentale. Ce qui permet de confirmer notre hypothèse selon laquelle la modélisation numérique est un outil d'aide à la décision pour optimiser les apports d'eau en irrigation de complément via les BCER. Ce résultat couplé à celui obtenu pour une décade sèche c'est-à-dire avec D1 a permis d'isoler la dose et l'intervalle des irrigations d'appoint. Cet intervalle a été calé à 6 jours dans une décade en absence d'un cumul de pluie de 50 mm en 5 jours dans la décade considérée. Ce qui sous-entend l'occurrence d'une pluie journalière d'au moins 10 mm sur la moitié de la décade pour l'entretien du réservoir en eau de la plante lequel a été confirmé par le comportement du profil hydrique sous le scénario D2. Cette pluie journalière de 10 mm peut constituer ainsi un seuil pertinent pour la détermination des séquences sèches agronomiques ou édaphiques au Sahel Burkinabè.

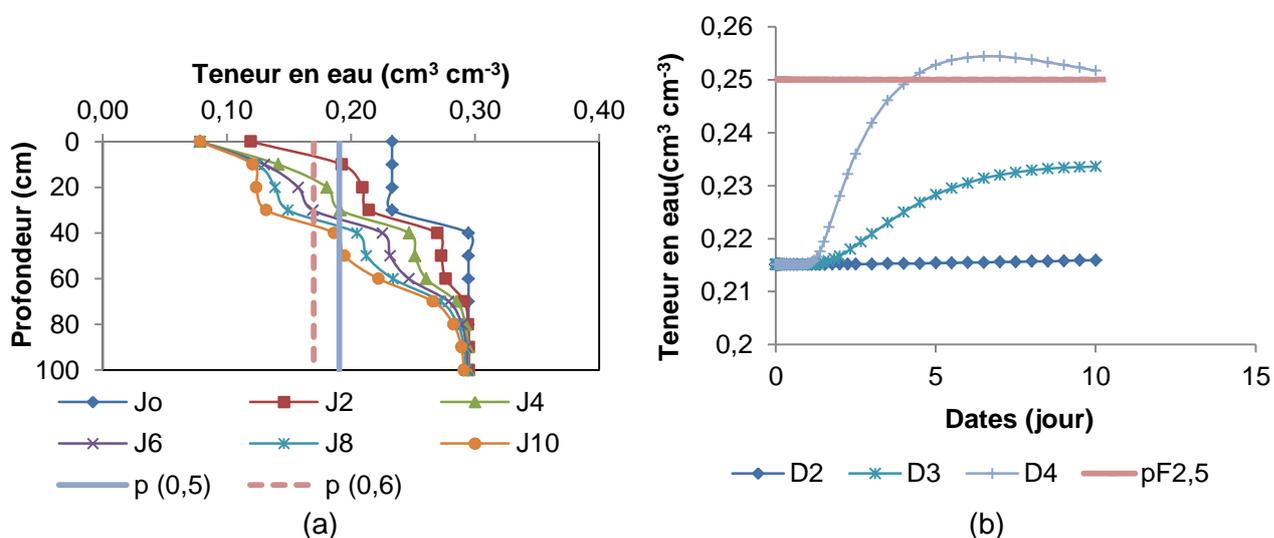


Figure 5-24: Profil hydrique (a) et reconstitution de l'eau utile du sol (b)

5.3.4. Recharge de la nappe phréatique par le BCER

5.3.4.1. Dynamique de la nappe phréatique

La fluctuation de la nappe phréatique joue un rôle important dans les flux d'eau de la zone insaturée située au-dessus de la frange capillaire. Elle peut contrôler la redistribution d'eau dans la zone insaturée exploitée par les racines des cultures surtout quand elle est peu

profonde. Les niveaux hydrostatiques de la nappe durant l'expérimentation de 2014 sont représentés à la **Figure 5-25**. L'analyse montre que la nappe phréatique a varié entre 1200 et 906 cm durant la période d'essai. La recharge potentielle de la nappe ne devient significative qu'à partir du 53^{ème} JAS avec une augmentation d'environ 4% le 54^{ème} JAS pour 270 mm de cumul pluviométrique. Ce cumul pluviométrique représentant environ 61% de la quantité totale de pluie enregistrée durant la période d'expérimentation est en partie à l'origine de cette remontée hydrostatique de la nappe.

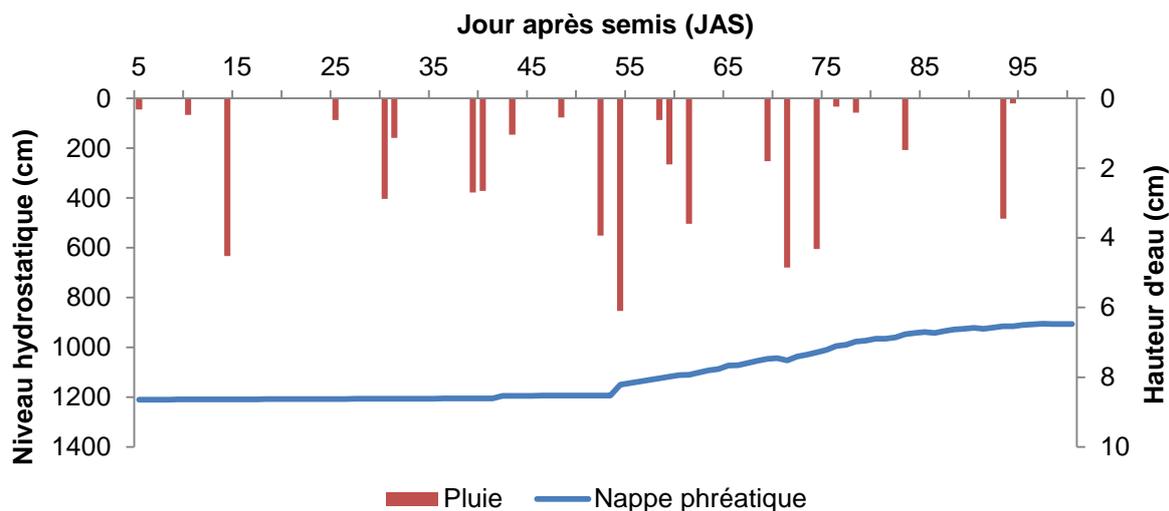


Figure 5-25 : Fluctuation du niveau de la nappe et de la pluie en 2014

5.3.4.2. Contribution du BCER à la recharge de la nappe phréatique

L'étude des flux d'eau dans la zone insaturée en dessous du BCER a montré une évolution variable selon l'année et selon la phase de développement du maïs. L'analyse globale a montré l'importance du flux vertical par rapport au flux horizontal quelle que soit l'année considérée.

En 2013, une vélocité plus importante a été observée durant le stade initial du maïs (5 à 10 JAS) émanant du taux d'infiltration élevé durant ce stade (**Figure 5-26**). Celle-ci a entraîné une saturation totale du profil sous-jacent le 20^{ème} JAS jusqu'à 800 cm de profondeur alors que ce front de saturation se trouvait à 500 cm 5 jours plus tôt. Cette dynamique plus importante est due à la conductivité hydraulique relativement élevée des couches supérieures (en moyenne $9,4 \text{ cm.j}^{-1}$).

En outre, le profil hydrique établi le 25^{ème} JAS montre une saturation totale de tout le profil sous-jacent se traduisant par une percolation à environ 1150 cm. A cette date, une intrusion totale du cône de réalimentation a été observée (**Figure 5-27**). Ainsi, la nappe sera continuellement rechargée tant que le bassin est alimenté en eau. Rappelons que c'est une

condition de charge constante ($h = 250$ cm) qui a été appliquée à la base du domaine de simulation puisqu'une piézométrie n'a pas été effectuée en 2013.

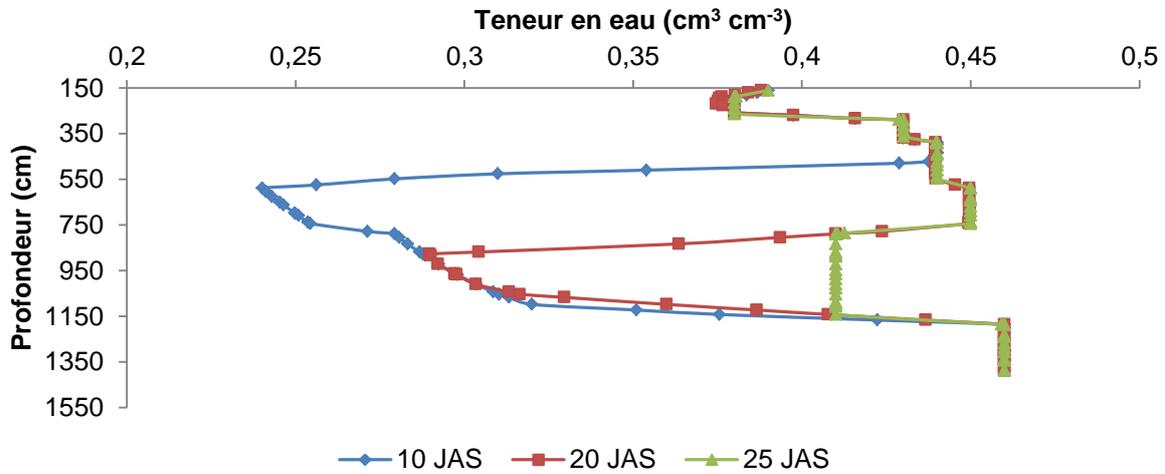


Figure 5-26: Profile hydrique pour trois dates en 2013

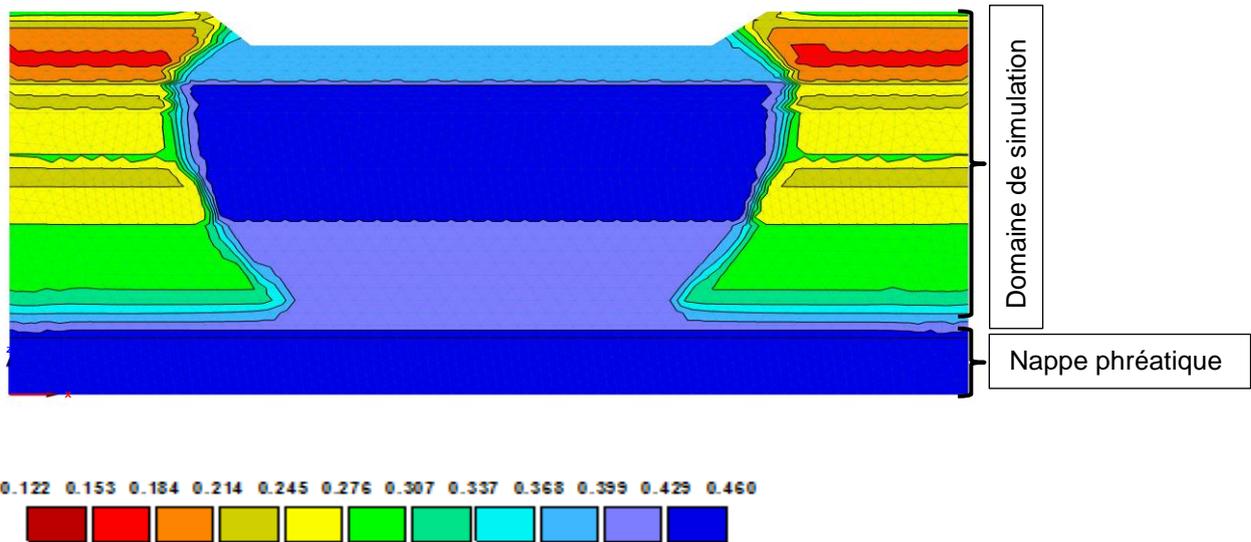


Figure 5-27: Teneur en eau ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) au 25 JAS sous le BCER en 2013

En 2014, l'évolution de la vélocité est plus lente compte tenu du changement de l'état de surface du fond du bassin à la fin de la campagne précédente suite au dépôt de particules fines. Cette modification des propriétés hydrauliques de surface a retardé le temps d'intrusion du front de saturation dans la nappe comme l'illustre la **Figure 5-28**.

Les profils hydriques montrent une discontinuité de saturation au stade initial (10 JAS) et au début de la période de reproduction (40 et 45 JAS). Le front de saturation/réalimentation atteint la nappe (superposition des profils hydriques) à 1197 cm environ autour du 45^{ème} JAS. Cette intrusion combinée à la décharge de l'excès d'eau des couches supérieures a contribué à la remontée significative du niveau hydrostatique de la nappe observée 10 jours

plus tard. Ce qui a favorisé non seulement un flux latéral plus important par rapport à la période avant intrusion mais également une plus grande disponibilité d'eau dans le BCER.

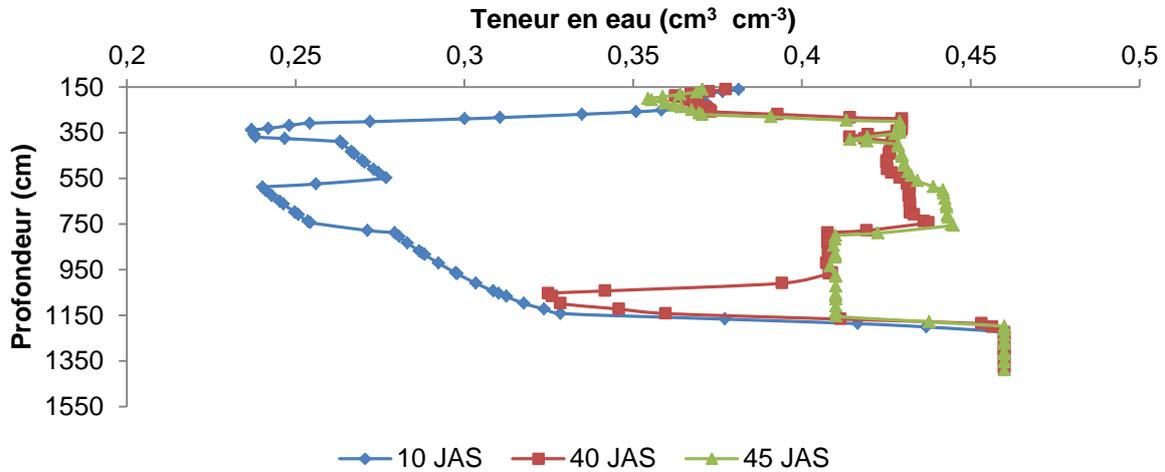


Figure 5-28: Profil hydrique du sol au stade initial et à la mi-saison en 2014

Au total, l'approche numérique de l'étude de la recharge de la nappe à partir des BCER confirme ainsi l'analyse faite sur la fluctuation du niveau hydrostatique de la nappe et permet dès lors d'accepter la deuxième hypothèse de cette étude. Cependant, cette contribution à la recharge de la nappe sous-jacente doit être considérée avec attention car les caractéristiques hydrauliques des couches profondes peuvent constituer d'importantes limites. Le BCER étudié dans le cadre de cette étude se trouvait sur un sol profond ne présentant pas de couches quasi-imperméable à l'issue des sondages pédologiques. Ce qui pourrait être à l'origine du comportement hydrique observé sur les profils hydriques établis sous le BCER. En présence de couches imperméables, le comportement hydrique des couches sous-jacentes sera totalement différent et constituera d'importante limite pour la recharge potentielle. Cependant, ceci pourrait accroître la disponibilité d'eau dans les BCER si cette couche se trouve à faible profondeur.

5.3.4.3. Les flux d'eau aux frontières du domaine de simulation

Les flux d'eau aux frontières du domaine de simulation se trouvent à la **Figure 5-29**. Une entrée d'eau par la limite inférieure du profil a été observée jusqu'au 24^{ème} JAS en 2013 suivi d'une décharge d'eau du sol dans la nappe durant le reste de la période de simulation.

En 2014, la combinaison des flux d'eau à la limite supérieure et inférieure du domaine montre une prédominance des flux entrant par rapport aux flux sortant avant la période d'intrusion du front de saturation/réalimentation (48^{ème} JAS) et très variable au-delà de cette période. Les flux d'eau intégrés le long de la limite inférieure du BCER ont été évalués à $6,6 \text{ cm}^2 \text{ j}^{-1}$. Ainsi, sur la base des flux cumulés à cette frontière, le taux de recharge de la

nappe a été évalué à $0,5 \text{ mm j}^{-1}$ sous le BCER. Ce qui a généré une recharge d'environ 5% de la capacité de stockage utile du BCER évaluée à 150 m^3 .

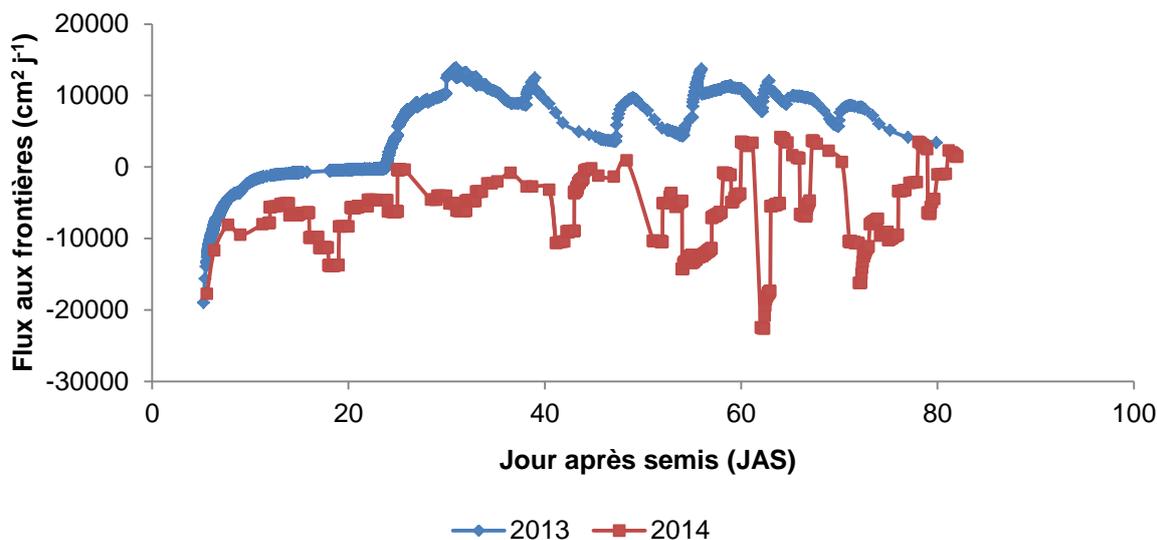


Figure 5-29: Flux d'eau aux frontières du domaine de simulation

Conclusion partielle

Dans l'étude de la mise en place de paramètres climatiques d'aide à la décision pour mieux planifier la maïsiculture pluviale au Sahel Burkinabè, les résultats ont permis de situer la période favorable de semis dans la troisième décade de juin. Cette stratégie de semis permet de réduire le risque de stress hydrique durant la période la plus sensible du maïs (la mi-saison) où des probabilités de l'ordre de 80% ont été observées pour des séquences sèches de plus de 7 jours. Cependant le développement de l'irrigation de complément couplé à ce scénario de semis a permis de montrer que cette technologie constitue l'une des alternatives novatrices à l'adaptation du risque climatique afin d'assurer la souveraineté alimentaire des ménages sahéliens du Burkina Faso. Ce couplage a permis d'enregistrer une augmentation moyenne de rendement du maïs de 22% sur les deux campagnes d'expérimentation.

L'analyse de la probabilité de remplissage des BCER sur les 52 campagnes agricoles précédant cette étude, a montré que le niveau de remplissage dépend de l'étendue de l'aire de captage sous certaines hypothèses simplificatrices. Cette probabilité a varié respectivement de 6 à 85% et de 19 à 94% pour un remplissage au trois quart et à moitié du volume total durant les décades les plus humides de la campagne agricole sous des impluviums de 0,5 à 2,4 ha. Ce qui montre que le risque maximal pour que le BCER ne soit pas rempli d'au moins de moitié durant la mi-saison était de 30% sous une aire de captage d'au moins 1,5 ha et de caractéristiques hydrauliques moyennes.

Au total, l'étude de la caractérisation de la campagne agricole a montré que l'introduction du maïs dans les assolements céréaliers passe par la mise en place de stratégie d'adaptation à la variabilité climatique. Dans ce sens, la promotion d'une variété extra précoce comme le *Barka* constitue une alternative à laquelle doit s'ajouter le calage approprié de la date de semis. Toutefois, la promotion de technologies visant à mobiliser l'eau à la parcelle pour la pratique de l'irrigation de complément est une alternative complémentaire au calage de la date appropriée de semis et amplifie par surcroît les stratégies d'adaptation basées sur l'information climatique pour l'augmentation de la résilience des agriculteurs vulnérables du Sahel Burkinabè. Ce chapitre a montré que la technologie des BCER permet d'atténuer les effets des poches de sécheresse en maïsiculture pluviale et d'assurer par surcroît la souveraineté alimentaire des populations vulnérables en zone de pluviométrie variable. Ce qui permet de confirmer hypothèse d'étude selon laquelle le BCER est adapté à l'irrigation de complément en zone sahélienne Burkinabè.

En outre, ce chapitre a également contribué non seulement à l'établissement du scénario d'irrigation de complément mais également a permis de mettre en évidence l'impact des BCER sur la dynamique de la nappe phréatique sous-jacente. L'analyse des résultats de simulation de quatre scénarii d'occurrence de pluie décadaire a permis d'isoler le scénario d'irrigation de complément adapté aux conditions pédoclimatiques du Sahel Burkinabè. A cet effet, une pluie journalière d'au moins 10 mm sur la moitié d'une décade est nécessaire pour l'entretien du réservoir en eau de la plante. En absence de cette pluie, une irrigation de complément doit être appliquée le sixième jour à l'intérieur de la décade considérée.

L'étude des flux d'eau sous le BCER à l'aide du code HYDRUS-2D/3D a révélé sur la base des profils hydriques établis, une recharge potentielle de la nappe phréatique. Durant les deux saisons agricoles successives de 2013 et 2014, une saturation totale du profil du sol sous-jacent du BCER a bien eu lieu avant le stage de fécondation du maïs. Sur la base des profils hydriques, cette recharge a été évaluée à 0,5 mm par jour. Ainsi, la vulgarisation des BCER peut non seulement permettre de sécuriser la production agricole des agriculteurs comme l'a montré l'étude expérimentale, mais constitue également un moyen potentiel de recharge des eaux souterraines dans le Sahel Burkinabè.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

Ce chapitre a porté sur la discussion générale des résultats de cette étude. A travers cette discussion, la position des résultats de la présente étude a été située par rapport aux travaux antérieurs déjà réalisés sur la thématique dans des conditions pédoclimatiques semblables à celles de la zone d'étude.

6.1. Etude statistique et expérimentale

6.1.1. Afrique subsaharienne face à la variabilité climatique

Pour faire face à la variabilité climatique, plusieurs technologies ont été mises en place au Burkina Faso. Parmi les technologies envisagées, la collecte des eaux de surface (CES) est listée comme mesure spécifique d'adaptation pour faire face aux changements climatiques futurs (Mwenge Kahinda *et al.*, 2010) surtout dans la zone sahélienne (Rockstrom *et al.*, 2002) particulièrement vulnérable aux impacts de la variabilité climatique et où des mesures adaptatives constituent une nécessité. Pour le moment, le développement de cette technologie est limité malgré son important potentiel dans la réduction des impacts de la variabilité climatique sur la sécurité de l'eau dans plusieurs régions de l'Afrique (Mwenge Kahinda *et al.*, 2010). Les risques de pertes de récoltes diminuent sous la collecte des eaux de surface lorsque celles-ci sont destinées à la production agricole à travers une irrigation de complément. Cependant, cette mesure est très peu adoptée en zone sahélienne burkinabè, une zone où moins de 1% des exploitations agricoles pratiquent l'irrigation (Ouédraogo *et al.*, 2010). Les quelques points de CES (boulis) sont à vocation pastorale et ménagère. Même quand ils sont utilisés pour l'irrigation de complément des céréales pluviales, c'est le sorgho qui est privilégié (Fox et Rockström, 2003) au détriment du maïs à cause de sa grande sensibilité au stress hydrique. Pourtant, c'est une céréale à haute valeur ajoutée qui valorise mieux l'eau et pouvant diversifier la ration céréalière du paysan sahélien. Dans ce sens, cette étude rompt cette barrière et expose une technologie de développement et de validation de l'irrigation de complément en maïsiculture via les BCER au niveau de l'exploitation agricole.

6.1.2. Importance du calage de la période favorable au semis du maïs

L'analyse des séries de pluies chronologiques constitue une voie d'appréhension du processus de sécheresse comme l'ont déjà montré Fodé et Adamou (1993) à travers une étude réalisée au Niger. Celle-ci permet d'étudier les risques climatiques imminents et d'établir des scénarii d'adaptation pouvant servir d'outil d'aide à la décision. Dans ce sens, l'analyse statistique des séries de pluies et son implication dans la maïsiculture pluviale en zone semi-aride (Moeletsi *et al.*, 2011) est l'une des alternatives pour caractériser la campagne agricole (Hills et Morgan, 1981) afin d'éviter d'importantes pertes de récolte.

Ainsi, l'analyse statistique de la campagne agricole réalisée dans cette étude a montré qu'un risque climatique se pose pour la maïsiculture pluviale dans le Sahel Burkinabè et seule une irrigation d'appoint serait la meilleure alternative. Cependant, la réussite d'un tel projet pour lequel la source d'eau est limitée, va dépendre du calage de la période favorable au semis pour réduire le risque de stress hydrique à la mi-saison et limiter les apports d'eau d'appoint. Ainsi, cette étude statistique des séquences sèches décennales et leur impact en maïsiculture pluviale a permis d'isoler la troisième décennie de juin et au pire des cas la première de juillet comme périodes favorables au semis du maïs dans le Sahel Burkinabè. Ces résultats corroborent ceux de Some et Sivakumar (1994), Wang *et al.* (2009), Sarr *et al.* (2015).

En effet, Some et Sivakumar (1994) ont situé la date moyenne de début des pluies dans le Sahel Burkinabè au 29 juin et un hivernage agronomiquement utile au 15 septembre pour une saison agricole de durée moyenne de 90 jours. Wang *et al.* (2009) ont montré sur la base de l'indice de contribution de la pluie que la période favorable au semis du maïs dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso est le mois de juin (5 juin). Ce qui peut entraîner un léger décalage en zone sahélienne burkinabè comme l'a montré cette étude qui situe cette période dans la troisième et la première décennie des mois de juin et juillet. L'étude réalisée par Sarr *et al.* (2015) a montré pour trois pays en zone semi-aride de l'Afrique subsaharienne (Burkina Faso, Niger, Tchad) que la date de démarrage de la période de croissance végétative est située entre la deuxième décennie de mai et la troisième de juin. La longueur de la période végétative quant à elle a été située selon ces auteurs entre 80 jours et 150 jours. Ce qui corrobore la longueur moyenne de 94 jours de la campagne agricole trouvée dans cette étude. De même, ces auteurs ont montré statistiquement qu'aucune différence significative au seuil de 5% n'a été observée entre les caractéristiques des saisons sur les quarante dernières années hormis la station de Kollo au Niger. Cette stationnarité a été également approuvée par Alhassane *et al.* (2013). Pour ces derniers, les risques agroclimatiques de la période récente (1991-2010) restent toutefois les mêmes que ceux sur la période historiquement sèche de 1970-1990 et renforcent ainsi nos analyses sur les caractéristiques de la campagne agricole dans le Sahel Burkinabè.

6.1.3. Contribution de la technologie de mobilisation d'eau à la parcelle à l'augmentation de la résilience des petites exploitations agricoles

La technologie de collecte des eaux de ruissellement dans des bassins individuels (BCER) permet aux petites exploitations agricoles de sauver leur saison agricole en cas de longues séquences sèches. En outre, ces petits bassins individuels permettent aux producteurs d'être indépendants du point de vue gestion de la ressource en eau contrairement aux contraintes d'allocation d'eau auxquelles ils sont confrontés dans les micro-barrages

communautaires (Makurira *et al.*, 2007). Aussi, le fait qu'aucun espace ne soit réservé pour la collecte des eaux de ruissellement, rend cette technologie meilleure par rapport à la technique de demi-lune où un impluvium non cultivé est nécessaire pour la collecte des eaux pluviales (FAO, 2001). En effet, la demi-lune d'une surface de 6 m² va recevoir l'eau d'un impluvium amont non cultivé de 10 m² voire 32 m² selon l'écartement adopté pour un nombre moyen de demi-lunes variant entre 312 et 417 à l'hectare (FAO, 2001). Dans ces conditions, la surface non cultivée représente en moyenne 79% de la surface à emblaver contre seulement 12% pour l'implantation du BCER d'étude. Ce qui constitue déjà un atout pour l'adoption de la technologie au Sahel Burkinabè où les parcelles cultivées sont généralement de petite taille (inférieure à 1 ha). Cependant, l'efficacité de ces bassins via l'irrigation de complément se heurte non seulement aux besoins en eau de la culture pratiquée mais également aux caractéristiques pédoclimatiques de la zone. Ce qui nécessite alors la conduite d'étude expérimentale afin d'évaluer la contribution des BCER dans l'alimentation hydrique de la culture en place à l'évolution du climat.

L'analyse de l'évolution temporelle du stock d'eau dans la zone racinaire du maïs à travers notre dispositif expérimental sur un sol sablo-limoneux a montré un comportement hydrique semblable dans toutes les parcelles même celles sous irrigation de complément. Néanmoins, l'irrigation de complément a été déterminante dans l'alimentation hydrique du maïs en zone sahélienne burkinabè grâce au BCER. Ces irrigations d'appoint ont permis de satisfaire les besoins en eau du maïs estimé entre 450 mm et 750 mm (Doorenbos et Kassam, 1987; du Plessis, 2003; Er-Raki *et al.*, 2007) dans lesquels l'irrigation a contribué jusqu'à 40%. Ce qui corrobore les conclusions de certains auteurs. En effet, Perret (2006) a montré que dans la partie sud-ouest du Burkina Faso, les besoins en eau des céréales sont facilement couverts en régime pluvial tandis que dans les régions soudano-sahéliennes et sahéliennes, l'irrigation de complément est nécessaire pour permettre aux cultures de boucler convenablement leur cycle de développement sans déficit hydrique. Cette contrainte climatique a amené Velazquez (2007) à proposer l'utilisation des variétés précoces moins exigeantes en eau dans les zones où l'eau est une ressource rare. Ce qui peut réduire considérablement le nombre d'irrigation d'appoint à appliquer durant le cycle cultural.

L'étude de la croissance en hauteur des plantes de maïs a révélé l'impact positif de la pratique de l'irrigation sur les performances de croissance de la plante. La différence de croissance enregistrée en 2013 au niveau des deux groupes de parcelles (sous irrigation et en régime pluvial) s'explique par les conditions favorables d'humidité dans lesquelles ont évolué les plantes des parcelles irriguées. Donc les périodes de stress hydrique traversées par les plantes dans les parcelles non irriguées seraient à l'origine de cette faible croissance qui n'est pourtant pas significativement différente de celle sous irrigation. La croissance nette

des plantes en 2014 sur l'ensemble des parcelles comparativement à celle de 2013 s'explique par l'existence de conditions hydriques favorables à leur croissance due au buttage des raies qui a favorisé plus la disponibilité de l'eau pour les plantes. Cette similarité de croissance en hauteur concorde avec le développement du système racinaire du maïs et stipule que les irrigations de complément n'ont pas impacté la biomasse racinaire. Ce résultat est contraire à celui trouvé par Jordan (1987) qui a montré que les biomasses racinaires subissent de très fortes variations en fonction de l'humidité du substrat. Cette différence s'explique par le fait que les irrigations appliquées s'étendent sur la période de reproduction du maïs. Or, à ce stade du cycle cultural, la biomasse racinaire est peu affectée suite à l'arrêt de croissance en hauteur de la plante. Aussi, le développement racinaire dense observé sur les rhizotrons émane de l'effet de l'engrais de démarrage (NPK) appliqué au 12^{ème} JAS à proximité des plantules. Cet engrais de démarrage améliore la vigueur des plantules et stimulent le développement racinaire (Hergert et Wortmann, 2006).

L'évapotranspiration réelle (ETR) déterminée dans cette étude variant selon le scénario d'irrigation de complément est en accord avec celles rapportées par Istanbuloglu *et al.* (2002) en zone semi-aride. Cet auteur a constaté que, sous irrigation à la raie, l'ETR du maïs était de 586 mm en irrigation contre 353 mm en régime pluvial bien comparables à celles du **Tableau 5-4**. Les rendements en grain obtenus à l'issue de cette étude ainsi que la productivité de l'eau témoignent du niveau de satisfaction des besoins en eau du maïs durant la période de culture. En régime pluvial ces rendements sont en général plus faibles que ceux obtenus sous irrigation de complément mais non significatifs en année de bonne répartition des pluies. Cependant, les irrigations de complément ont permis d'obtenir des gains allant jusqu'à 1000 kg.ha⁻¹ comparables à ceux obtenus en agriculture de conservation par Rockstrom *et al.* (2009) en Ethiopie, Kenya, Tanzanie et Zambie. Cette différence non significative est due à la variété de maïs utilisée qui est une variété améliorée et résistante à la sécheresse. Les poches de sécheresse de plus de sept jours n'ont pas été observées au cours de la période de reproduction du maïs, une période très sensible au stress hydrique (du Plessis, 2003). Aussi, le suivi de la pression matricielle du sol a montré qu'elle n'est pas tombée en dessous du seuil de 0,6 bar correspondant approximativement au tarissement de 50% de l'eau du sol. En outre, les jours de semis calés à travers cette étude correspondent à la période favorable au semis du maïs dans le Sahel Burkinabè (Wang *et al.*, 2009). Cette période de semis qui a été déjà suggérée plus tôt par Some et Sivakumar (1994) permet aux cultures d'éviter le stress hydrique sévère au cours de la saison agricole. La significativité de la contribution de l'irrigation de complément à l'augmentation des rendements céréaliers en zone sahélienne devient perceptible en année de fréquentes poches de sécheresse comme l'ont souligné Fox et Rockström (2003). L'écart se creuse davantage lorsque les séquences

sèches affectent la période la plus sensible au stress hydrique (Doorenbos et Kassam, 1987 ; Payero *et al.*, 2009). Ainsi, cette irrigation de complément à partir d'une source d'eau individuelle et proche des parcelles cultivées permettra donc aux producteurs sahéliens de diversifier leurs cultures céréalières par introduction du maïs. Ce qui peut générer d'importantes ressources financières puisqu'au Burkina Faso, environ 34% de la production de maïs passe par le marché du grain contre seulement 15% pour les autres céréales sèches les plus cultivées (sorgho et mil) (DGPER, 2010). Cette culture, plus convoitée dans les grandes villes du pays constitue un atout important pour devenir une culture de rente par rapport aux autres céréales sèches. De plus, en zone rurale cette culture a une importance cruciale en période où le stock de sorgho et de mil est épuisé (au début de la campagne agricole).

L'analyse des transferts d'eau et des rendements a montré la nécessité de l'irrigation de complément en maïsiculture dans le Sahel Burkinabè pour augmenter la production pluviale. Cependant, le facteur le plus important dans le scénario d'irrigation de complément adoptée est la dose de l'irrigation de complément qui dépend des caractéristiques du sol et de l'eau disponible dans le BCER. Néanmoins, le suivi limnimétrique du niveau d'eau dans le BCER lors de l'expérimentation a montré une lame d'eau moyenne de 65,5 mm pour irriguer une parcelle de 0,2 ha. En outre, l'eau disponible dans le BCER a varié entre 36 et 88 mm à la mi-saison (40 à 65 JAS). Il en résulte donc que pour plus de vingt jours de poche de sécheresse, le scénario T2 peut mieux atténuer l'effet de cette séquence sèche sur le rendement du maïs que le scénario T3. La raison est que T2 a besoin d'au moins 80 mm contre 120 mm pour T3 dans l'hypothèse qu'une dose de 40 mm est appliquée durant chaque phase ciblée à la mi-saison. Aussi, pour le scénario T1 les deux irrigations appliquées sont trop rapprochées par rapport à T2 et toute poche de sécheresse apparaissant durant la période de remplissage des grains affectera significativement le rendement (du Plessis, 2003). À la fin de la saison agricole, la lame d'eau moyenne était de 60 mm en 2013 et 81 mm en 2014. Cette différence considérable est due au colmatage du sol à la fin de 2013 qui a réduit considérablement l'infiltration de l'eau dans le sol comme l'ont trouvé Niang *et al.* (2012) dans le Sahel Burkinabè. Cette disponibilité d'eau permet aux petits exploitants agricoles de diversifier leur production agricole en introduisant le maraîchage. De plus, le gain de rendement de 400 à 1000 kg.ha⁻¹ généré par la pratique de l'irrigation de complément assure la couverture des besoins annuels en maïs de 3 à 5 personnes additionnelles sous les normes de consommation établies à 190 kg/personne/an (CILSS, 2001). Ainsi, à travers cette technique l'action contre la faim pourra devenir une réalité au Burkina Faso renforçant ainsi la politique agricole proposée par du Vachat (2013). Cependant, le taux d'adoption de cette technologie peut être réduit par son coût relativement élevé. En effet, l'évaluation économique de tous les types de BCER construits au Sahel

Burkinabè dans le cadre du projet a révélé des coûts variant entre 800.000 et 2.000.000 FCFA selon le type d'imperméabilisation du BCER (Zongo, 2015). Ce coût total d'acquisition, incluant toutes les charges ainsi que le coût d'opportunité de la terre et d'entretien du système, n'est certainement pas à la portée du ménage sahélien. Néanmoins, les études socioéconomiques réalisées en complément à cette étude par Zongo (2015) sur le même site à partir des résultats agronomiques ont montré que l'irrigation de complément a permis de dégager un surplus de 41 180 ; 66 259 et 225 688 F CFA respectivement en 2012, 2013 et 2014. Ce qui constitue une importante ressource financière pour les agriculteurs sahéliens. Ainsi, la subvention de 100.000 FCFA que le gouvernement Burkinabè a instauré depuis 2012 pour la reproductibilité de la technologie à travers son programme de construction de 10 000 bassins constitue déjà un moyen pour alléger le coût d'acquisition de ces ouvrages et permettre aux agriculteurs vulnérables d'accéder à ces marges brutes. Cette technologie ne vient que renforcer les nombreuses initiatives de l'Etat Burkinabè à travers plusieurs projets tels que le PPCMC-BF, le SIIP et la « brigade mobile d'irrigation ». A cette subvention doit également s'ajouter la cohésion sociale pour la mise en œuvre de la technologie à travers un travail communautaire.

En somme, la technique de collecte des eaux pluviales et le détournement des cours d'eau temporaires pour l'irrigation des cultures pluviales est bien connue au Kenya, en Tanzanie, au Zimbabwe et dans nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest (Habtamu, 1999 ; Falkenmark *et al.*, 2001; Tesfai et Stroosnijder, 2001 ; Fox et Rockström, 2003 ; Haregeweyn *et al.*, 2006 ; Mupangwa *et al.*, 2006). Les techniques de collecte des eaux pluviales permettent aux petits exploitants agricoles d'avoir des rendements élevés et d'améliorer leur autosuffisance alimentaire (Baron, 2004). Ainsi, si l'approvisionnement en eau des BCER est fiable, les petits exploitants agricoles sont encouragés à investir et leur souveraineté alimentaire peut s'améliorer. Cette contribution à la souveraineté alimentaire à travers le développement des technologies de collecte des eaux de surface a été déjà rapportée par Agarwal et Narain (1999) et Wondimkun et Tefera (2006). Ces derniers ont montré en zone semi-aride, que si 5 à 10% des terres sont utilisées pour la collecte des eaux de surface, il y aura assez d'eau pour les besoins d'irrigation et des ménages. Une grande adoption des BCER est alors très importante pour l'agriculture burkinabè essentiellement pluviale. Cette adoption permettra d'augmenter non seulement l'emblavure de maïs actuellement établit à environ 3% des emblavures céréalières (MARHASA, 2014), mais également faire décoller de zéro hectare la superficie de maïs sous irrigation dans le Sahel Burkinabè. En outre, le contrôle de l'érosion des sols est l'un des avantages supplémentaires de cette technique bien adaptée au Sahel Burkinabè, une des régions les plus sujettes à la dégradation des ressources naturelles, plus particulièrement le sol.

Dans une perspective d'optimisation de l'emblavure irrigable en cas d'une séquence sèche de durée déterminée, un bilan d'eau global simplifié a été établi dans le système constitué par le BCER, son impluvium et la parcelle cultivée. L'étude de la probabilité de remplissage du BCER sous les conditions pluviométriques historiques a montré que sous une aire de captage de plus de 0,5 ha, le BCER peut être rempli d'au moins de moitié cinq à huit années sur dix durant la mi-saison. Des diverses simulations effectuées, l'aire minimale de captage est de 0,5 ha pour une superficie optimale irrigable de 0,20 ha. Sous ces conditions, le BCER peut satisfaire les besoins en eau du maïs sur deux décades sans pluie dans l'hypothèse que le BCER soit rempli au trois quart de sa capacité au semis. L'emblavure optimale peut être augmentée jusqu'à sa valeur maximale de 0,5 ha à condition que l'aire de captage soit décuplée.

L'étude statistique de la campagne agricole et celle expérimentale ont permis de jeter les bases d'optimisation d'un scénario d'irrigation de complément adapté aux conditions agroclimatique du Sahel Burkinabè. Le couplage de la période appropriée au semis du maïs avec la phase sensible au stress hydrique a permis d'isoler partiellement ce scénario d'irrigation de complément. Ainsi, le scénario de deux irrigations de complément avec au moins 40 mm de lame d'eau et ciblant la floraison et le stage de remplissage des grains (c'est-à-dire la mi-saison), est la stratégie appropriée pour mieux atténuer les effets des sécheresses dans le Sahel Burkinabè lorsque le semis se fait dans la troisième décade de juin. Cependant, le scénario isolé reste très local et ne cible que la période la plus sensible au stress hydrique. De plus il n'intègre pas la réaction des sols sous irrigation à l'évolution des caractéristiques climatiques de la campagne agricole. Un sol à texture moyenne n'a pas la même aptitude de restitution d'eau à la plante qu'un sol à texture lourde pour la même séquence sèche. Cette situation nécessite alors la définition d'informations climatiques et de management pour mieux aider le producteur à planifier la campagne agricole (Ingram *et al.*, 2002) surtout les irrigations de complément. Parmi ces informations, le seuil de la pluie à partir duquel une période sera déclarée sèche, la dose et la fréquence des irrigations de complément sont les plus importants en zone sahéenne où l'irrigation est une nécessité. Ces informations capitales ont été rapportées dans le deuxième chapitre de cette partie et ont permis d'optimiser un scénario d'irrigation de complément à partir de ces BCER.

6.2. Spatialisation de la contribution agronomique et hydrologique des BCER

L'étude expérimentale réalisée a permis certes de proposer une stratégie d'atténuation des séquences sèches en zone sahéenne Burkinabè par l'irrigation de complément à partir des BCER mais celle-ci ne sera valable que localement. Les stratégies d'adaptation à la variabilité climatique doivent surpasser cette dimension locale pour proposer des scénarii tenant compte de la variation spatiale et temporelle du phénomène. La circonscription de ces

scénarii d'adaptation en agriculture pluviale, nécessite le calage des paramètres entrant dans leur définition. Ces paramètres qualifiés d'informations de précampagne au même titre que celles déterminées durant l'étude statistique constituent un référentiel non seulement pour les développeurs du milieu rural mais également les producteurs. Dans ce sens, l'approche de modélisation numérique constituant un moyen robuste pour synthétiser et spatialiser un phénomène permet d'isoler ces paramètres. Ainsi, sur la base des caractéristiques pédoclimatiques de la zone d'étude et des résultats de l'étude des transferts d'eau dans le sol à l'aide de HYDRUS-2D/3D. Ce code a été déjà utilisé en 1D par Tamini (2002) pour optimiser la stratégie d'irrigation en maraîchage au Burkina Faso. Ses études ont montré que le modèle est très sensible aux variations des paramètres hydrauliques du sol. Ce qui corrobore les résultats d'analyse de sensibilité réalisée dans le cadre de cette étude et ses potentialités d'outil d'aide à la décision et à la gestion des irrigations. En outre, les informations de précampagne déterminées dans cette étude corroborent bon nombre de travaux antérieurs. En effet, le seuil de pluie journalière de 10 mm calé dans la présente étude a été également retenu par Smadhi et Zella (2012) afin de prendre en compte les besoins en eau des céréales du semis à la maturation dans l'étude des séquences sèches en zone semi-aride. La dose d'irrigation de complément de 50 mm obtenue à l'issue de l'étude de la redistribution de l'eau dans le sol sous trois scénarii d'occurrence de pluie décadaire va dépendre du volume d'eau disponible dans le BCER. Cependant, le suivi limnimétrique de la variation temporelle de l'eau du BCER durant l'expérimentation a montré une lame d'eau moyenne de 65 mm en 2013 et 95 mm en 2014 avec une perte d'eau journalière respective de 20 et 9% en moyenne par infiltration et évaporation. A la maturation du maïs la lame d'eau disponible est en moyenne de 67 mm en 2013 contre 108 mm en 2014. Ce qui pourra permettre aux petites exploitations agricoles de diversifier leur production agricole par introduction du maraîchage à la fin de la mi-saison. Cette expérience de collecte des eaux de pluie pour l'irrigation de complément des cultures pluviales est bien connue au Kenya, en Tanzanie et dans de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest (Fox et Rockström, 2003). Ainsi, si l'approvisionnement en eau de ces BCER est fiable, les agriculteurs sont alors incités à investir et leur ration alimentaire pourra s'améliorer. Dans ce sens, l'objectif fixé par l'Organisation des Nations unies pour l'Alimentation (FAO) lors de sa deuxième conférence internationale sur la nutrition (ICN2, 2014) pourra être atteint à travers la mise en œuvre de cette technologie. En effet, concernant la nutrition, les enjeux sont aujourd'hui différents. Il y a de cela 20 ans, la FAO se préoccupait de comment nourrir toute la population en perpétuelle augmentation. Mais aujourd'hui ce n'est plus la quantité qui compte mais la qualité de la nourriture dans une zone comme le Sahel Burkinabè où les enfants n'ont accès qu'à un certain type d'aliments (mil, sorgho). L'expansion de la technologie des BCER au Sahel Burkinabè va donc permettre non seulement d'augmenter et

de stabiliser les rendements mais va également permettre de varier la ration céréalière par introduction de la culture du maïs dans leur assolement et la pratique du maraîchage. Aussi la recharge des nappes phréatiques constitue-elle des avantages additionnels de cette technique bien adaptée au Sahel Burkinabè, l'une des zones les plus défavorisées en eaux souterraines.

En effet, l'étude des transferts d'eau sous le BCER a montré que ce dernier contribue à la recharge locale de la nappe phréatique. Cette recharge à partir du BCER devient significative pour un cumul de pluie de 270 mm et corrobore les travaux de Sharda *et al.* (2006), Kaushal (2009). Pour Sharda *et al.* (2006), un cumul minimum de 104,3 mm de pluie est nécessaire pour générer 1 mm de recharge à partir des structures de stockage d'eau d'une superficie de 0,61 à 9,4 ha. Kaushal (2009) quant à lui a rapporté que 10 mm de précipitations sur 100 m² de toiture contribue pour 10 mm à la recharge de la nappe à travers les structures de collecte d'eau de pluie des toitures dans le district de Ludhiana en Inde. Hut *et al.* (2008) ont également montré à travers un modèle simple de transfert des eaux souterraines l'effet positif des barrages de sable sur la dynamique de la nappe phréatique à l'Est du Kenya. Cependant, l'importance de ces flux dépend de la variabilité du climat d'une année à l'autre, du niveau hydrostatique de la nappe (Smerdon *et al.*, 2008) et des caractéristiques hydrodynamiques du profil de sol sous-jacent.

La remontée de la nappe sur notre site expérimental a conditionné la disponibilité d'eau dans le bassin durant la mi-saison et l'arrière-saison (54^{ème} au 82^{ème} JAS). La lame d'eau moyenne disponible dans le BCER sur cette période a été de 109 mm contre 87 mm durant la période précédente de la campagne agricole de 2014. Cette plus grande disponibilité d'eau durant cette période qui couvre la phase la plus sensible du maïs (phase de reproduction) constitue un atout considérable pour la pratique de l'irrigation d'appoint pour une dose au moins égale à 50 mm. Ainsi, au Sahel Burkinabè où l'évapotranspiration de référence est en moyenne de 4 mm.j⁻¹ (écart type $\sigma = 0,9$ mm.j⁻¹) durant la campagne agricole, les besoins en eau du maïs peuvent être couverts à la mi-saison sur une décade sèche.

L'analyse des fluctuations du niveau hydrostatique partiellement explorée dans le présent document a été largement appliquée sous diverses conditions climatiques pour la détermination à court et long terme des changements dans la recharge de la nappe (Healy et Cook, 2002 ; Sharda *et al.*, 2006 ; Bhatt *et al.*, 2012). D'autres auteurs ont également utilisés l'approche numérique (Downer et Ogden, 2004 ; Small, 2005 ; Smerdon *et al.*, 2008 ; Vogel et Ippisch., 2008 ; Wang *et al.*, 2009 ; Carrera-Hernández *et al.*, 2012) dans des études relatives à la recharge de la nappe. Mais la plupart de ces travaux de modélisation des flux d'eau dans la zone insaturée ont été effectués en 1-D (flux verticaux) sur une colonne de sol

homogène (monolithic columns) contrairement à cette étude réalisée en 2-D dans un domaine multicouche.

Certes, l'analyse de la recharge locale abordée dans la présente étude ne peut être généralisée à l'échelle du bassin versant mais a toute sa raison d'être vu la proximité des puits piézométriques et du réseau hydrographique peu dense du milieu d'étude. En effet, des technologies similaires ont été développées dans certains pays non pas pour la pratique de l'irrigation d'appoint mais plutôt pour contribuer à la recharge de la nappe par la collecte des eaux de pluie et/ou de ruissellement (Flint *et al.*, 2002). Ainsi, la mise en œuvre du projet de construction de dix mille bassins initié par le gouvernement burkinabè et ses partenaires dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne va forcément affecter l'hydrologie des bassins versants. Ces bassins construits en milieu semi-aride comme le Sahel Burkinabè vont permettre non seulement la mitigation des séquences sèches en agriculture pluviale via la pratique de l'irrigation de complément mais également constituent des ouvrages potentiels de recharge locale de la nappe qui varie selon Sharda *et al.* (2006) de 9 à 50% de leur capacité de stockage utile. Dans les formations géologiques essentiellement constituées de roches basaltiques, la recharge a été située entre 3 et 15% de la lame d'eau infiltrée (Kumar, 2012). Le taux de recharge estimé dans cette étude est inférieur aux taux proposés par Sharda *et al.* (2006). Cette situation trouve son explication dans la taille du BCER qui est au moins 15 fois plus petit que les structures de stockage d'eau étudiées par ces auteurs.

Cependant, une étude plus approfondie de la relation entre les eaux des BCER et les eaux souterraines peut être menée dans cette zone à l'aide d'un modèle numérique dont l'importance a été déjà rapportée par Qureshi *et al.* (2013). Dans ce sens, les limites du présent travail pourront être prises en compte en combinant les caractéristiques hydrologiques, géologiques et écologiques de la zone afin d'appréhender la relation entre eaux de surface et eaux souterraines (Sophocleous, 2002). Néanmoins, cette étude de modélisation numérique de la zone insaturée au-dessus de la frange capillaire dans un sol profond a permis de montrer le rôle vital que joue les structures de stockage d'eau dans la recharge de la nappe. De même, la recharge de la nappe via les infiltrations directes des pluies fortement limitées par la complexité de la zone insaturée entre les eaux de surface et les eaux souterraines, peut être renforcée par celle provenant de ces structures de stockage. Car les sols du Sahel Burkinabè sont fortement dégradés ; ce qui engendre un ruissellement important vers les plans d'eau ne favorisant pas ainsi la recharge locale de la nappe. Ainsi, les BCER construits dans cette zone peuvent permettre l'atténuation des effets assortis de la baisse des pluies qui provoqueront selon AGRA (2014) une diminution de 50 à 70% du taux de recharge des eaux souterraines en Afrique de l'Ouest à l'horizon 2050.

Conclusion partielle

Ce chapitre a situé la position des résultats de la présente étude par rapport aux études antérieures réalisées sur la même thématique. Il a été montré que la contribution agronomique et hydrologique des bassins de collecte des eaux de ruissellement corrobore plusieurs études antérieures. Ce qui renforce l'importance de cette technologie pour l'atténuation des poches de sécheresse longues et récurrentes au Sahel Burkinabè.

Au total, cette étude qui a montré les potentialités agronomiques et hydrologiques constitue non seulement un tremplin pour un développement agricole durable au Sahel Burkinabè mais aussi le début d'autres études dans ce domaine.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale

Le dérèglement climatique entamé au Burkina Faso dans les années 70 continue de s'amplifier de nos jours et en particulier dans la zone sahélienne. Cette zone agroclimatique, caractérisée par une forte dégradation des terres et des techniques de conservation des eaux et des sols développées au fil des années et devenues inefficaces face à la variabilité climatique, ne permet plus aux producteurs de profiter de leur céréaliculture pluviale. Dès lors il urge de trouver une alternative permettant aux exploitations agricoles familiales d'assurer leur souveraineté alimentaire. C'est dans ce sens que le 2IE a initié le projet irrigation de complément à partir des bassins de collecte des eaux de ruissellement afin de suppléer la pluie durant les longues séquences sèches. Ainsi, cette étude qui a pour objectif d'évaluer la contribution de ces petits bassins individuels à l'atténuation des poches de sécheresse récurrentes au Sahel Burkinabè a montré expérimentalement l'importance de ces bassins dans le maintien d'un confort hydrique à la plante en période sèche. Cette technologie de mobilisation d'eau à la parcelle permet aux petites exploitations agricoles, représentant l'épine dorsale du développement agricole en Afrique subsaharienne, de sauver leur culture pluviale et d'améliorer leur souveraineté alimentaire. Au Sahel Burkinabè, hormis cette contribution agronomique des bassins de collecte des eaux de ruissellement, une contribution hydrologique potentielle a été également rapportée par ce travail.

Caractérisation statistique de la campagne agricole dans le Sahel Burkinabè

Les résultats de l'étude statistique des pluies chronologiques de 1960 à 2012 ont montré que la date moyenne de début et de fin de campagne a été située respectivement au 24 juin et au 19 septembre. Le démarrage précoce de la campagne agricole (12 juin) conduit à une probabilité élevée (92%) d'avoir une saison culturale d'au moins trois mois. Cette probabilité chute à 67% pour une date de début située au 29 juin et n'est que de 20% pour le démarrage tardif de la campagne agricole (14 juillet). La probabilité pour que la saison culturale dure plus longtemps est très faible ou nulle quelle que soit la date de démarrage de la campagne agricole au Sahel Burkinabè. Ces résultats ont permis de montrer qu'une variété tardive (>120 jours) a seulement 13% de chance de boucler convenablement son cycle contre respectivement 60% et 40% pour une variété moyenne (90-120 jours) et précoce (<90 jours). Cette caractérisation de la campagne agricole a permis de situer au Sahel Burkinabè les périodes les plus favorables au semis dans la troisième décennie et la première moitié des mois de juin et juillet respectivement. La distribution markovienne des séquences sèches décennales a montré que la probabilité d'avoir deux décades consécutivement sèches est très élevée (60 à 96%) en début (mai-juin) et fin (septembre-octobre) de campagne agricole. Cette probabilité atteint ses minima (13 à 19%) au milieu de

la campagne. A l'opposé, la probabilité que deux décades humides se succèdent est relativement forte dans le mois d'août (35 à 44%). Ce qui a permis de caler les dates de semis dans la troisième décade de juin afin de faire coïncider les périodes sensibles du maïs aux décades les plus humides de juillet et d'août.

Contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement à l'atténuation des effets des poches de sécheresse

Les résultats de l'étude expérimentale de l'irrigation de complément ont révélé que le fonctionnement hydrique des unités expérimentales était étroitement lié aux régimes hydriques appliqués. Les mesures humidimétriques et tensiométriques ont révélé des périodes de stress hydrique peu sévère sur les trois années d'expérimentation (2012, 2013 et 2014) durant la phase de reproduction du maïs. Les scénarii d'irrigation de complément T1, T2 et T3 ont reçu respectivement 96, 83 et 128 mm d'eau d'appoint. La consommation en eau journalière du maïs sous les scénarii T2 et T3 varie de 5,4 mm à 5,6 mm contre 5,8 mm à 6,1 mm sous le scénario T3. Ce résultat confirme que deux irrigations de complément ciblant la mi-saison (la floraison et le remplissage des grains) valaient autant que trois (floraison, la pollinisation et le remplissage des grains). Sur les deux dernières années d'étude, les parcelles en régime pluvial ont reçu respectivement 454 mm et 497 mm de pluie durant l'essai pour produire en moyenne 3600 et 3800 kg.ha⁻¹ de maïs grain sous des conditions agronomiques optimales. Les parcelles sous irrigation de complément ont moyennement produit durant ces deux années 4400 et 4450 kg.ha⁻¹ pour deux irrigations de complément contre 4600 et 4800 kg.ha⁻¹ pour trois irrigations d'appoint. Les rendements les plus élevés, notés dans les parcelles sous irrigation de complément étaient dus au confort hydrique dans lequel ont évolué les plantes sur les unités expérimentales affectées à T1, T2 et T3. Cependant, aucune différence significative n'a été observée (p-value > 0,05) au seuil de 5% entre ces rendements. L'efficacité d'utilisation de l'eau a été estimée à 1,1 kg.m⁻³ en moyenne quel que soit le traitement appliqué. Néanmoins, l'irrigation de complément a permis d'obtenir un gain de rendement variant entre 400 et 1000 kg.ha⁻¹. Ce qui constitue pour les petits producteurs une importante autre source céréalière difficilement accessible au Sahel Burkinabè puisque le mil et le sorgho sont préférés au maïs dans les assolements. La promotion de la technologie va également permettre d'augmenter la superficie irriguée en maïs qui représentait en 2002 une superficie de 5000 ha pour tout le Burkina Faso (FAO, 2005). La contribution moyenne de l'irrigation de complément à l'augmentation du rendement était de 21% en 2013 et 2014. La contribution moyenne de T3 était respectivement de 24 et 26% en 2013 et 2014 contre 18 et 10% pour T1, 18 et 19% pour T2. Ainsi, la floraison et le remplissage des grains étaient les stades de développement les plus importants pour appliquer les apports d'eau complémentaire en zone sahéenne Burkinabè. L'étude de la probabilité de remplissage des BCER a montré que le risque maximal pour que les BCER ne

soient pas rempli d'au moins de moitié durant la mi-saison a été estimé à 30% pour une aire de captage de plus de 1,5 ha et possédant des caractéristiques hydrauliques moyennes.

Optimisation du scénario d'irrigation de complément dans les conditions agropédoclimatique du Sahel Burkinabè

Dans une perspective de spatialisation de la contribution de l'irrigation de complément à partir des BCER, une étude de modélisation des transferts d'eau dans le sol a été effectuée afin de valider les résultats expérimentaux sous la variété de maïs *Barka*. Les résultats de simulation en irrigation à la raie ont montré une concordance satisfaisante des humidités mesurées et simulées (RMSE = 0,03 à 0,05 cm³ cm⁻³). La simulation réalisée sur les caractéristiques hydrauliques moyennes des sols du Bam apte à l'agriculture a permis de déterminer le temps durant lequel un tarissement admissible de l'ordre de 50 à 60% est atteint. Ce temps constituant l'intervalle d'irrigation d'appoint est couplé aux résultats de la simulation de trois scénarii (D2 = 10 mm, D3 = 40 mm et D4 = 50 mm) de cumul de pluie décadaire pour la reconstitution de la réserve en eau du sol afin de déterminer la dose d'irrigation. Les résultats ont montré qu'en six (06) jours, la réserve en eau utile du sol est vidée de moitié et ne peut être reconstituée qu'avec une lame d'eau de 50 mm correspondant au scénario D4. Ainsi, en absence d'une pluie journalière d'au moins 10 mm sur cinq jours dans une décade surtout durant la période de reproduction du maïs, l'irrigation d'appoint doit être appliquée le sixième jour.

Contribution des bassins de collecte des eaux de ruissellement à la recharge de la nappe phréatique et optimisation de l'emblavure irrigable

L'étude de la contribution des BCER partiellement imperméabilisés à l'atténuation des poches de sécheresse et à la recharge de la nappe sous-jacente a montré sur les campagnes d'expérimentation de 2013 et 2014, une plus grande disponibilité d'eau dans le BCER et une initiation de la réalimentation de la nappe à la mi-saison. Cette saturation du profil sous-jacent du BCER a été enregistrée à la mi-saison où une remontée moyenne de 4% du niveau de la nappe a été observée dans les dix jours qui suivent la saturation. Le flux d'eau sortant a été évalué à 6,6 cm² j⁻¹ à la limite inférieure du profil correspondant à une recharge de 0,5 mm j⁻¹. La lame d'eau moyenne disponible dans le BCER sur cette période a été de 109 mm contre 87 mm durant la phase de croissance du maïs. Cette plus grande disponibilité d'eau durant cette période qui couvre la phase la plus sensible du maïs (phase de reproduction) constitue un atout considérable pour la pratique de l'irrigation d'appoint pour une lame d'eau au moins égale à 50 mm. En outre, la simulation de l'évolution temporelle du volume d'eau dans le BCER sur la base des séries pluviométriques historiques de la période 1960-2012 a permis d'optimiser l'emblavure minimale en maïs

estimée à 0,20 ha pour une aire minimale de captage de 0,5 ha nécessaire pour l'alimentation en eau des BCER.

Au total, la pratique de l'irrigation de complément via les BCER permet non seulement d'atténuer les effets dus à la variabilité climatique au Sahel Burkinabè, mais également d'accroître la résilience des petites exploitations agricoles familiales. Avec cette technologie, ces petites exploitations agricoles familiales représentant l'épine dorsale de l'agriculture durable en Afrique Subsaharienne peuvent améliorer leur subsistance alimentaire et par surcroît reculer les frontières de l'insécurité alimentaire. Cependant, il est trop tôt d'affirmer avec certitude sur deux campagnes agricoles que ces BCER permettent d'endiguer les effets des poches de sécheresse et de recharger les nappes phréatiques. Ainsi, des pistes de réflexion ont été proposées à la suite de ce travail de recherche.

Perspectives

Cette étude a montré l'importance des bassins de collecte des eaux de ruissellement (BCER) dans l'atténuation des effets induits par la variabilité climatique en agriculture pluviale. Cette contribution dépend essentiellement des conditions pédoclimatiques du milieu, de la culture à pratiquer, des caractéristiques hydrauliques de surface, de l'aire de captage et des usages domestiques. Les caractéristiques hydrauliques de l'aire de captage vont conditionner la disponibilité d'eau dans le BCER pour la pratique de l'irrigation de complément au même titre que les besoins d'eau pour les usages domestiques. L'impact de ces divers paramètres ne peut être appréhendé qu'à travers une modélisation de l'ensemble du système impluvium-BCER-sol-plante-atmosphère auxquels s'ajoutent éventuellement la composante « domestique ». La présente étude a tenté de comprendre partiellement certains aspects de ce système. Le modèle HYDRUS utilisé pour la spatialisation des résultats expérimentaux et la proposition du mode de gestion de l'eau des BCER n'a intégré que trois composantes du système. Il s'agit du continuum sol-plante-atmosphère. Dans ce sens, d'autres études peuvent être menées afin d'étudier les transferts d'eau sur l'aire de captage et son impact sur le remplissage des BCER. Ces études peuvent également s'appuyer sur un modèle de croissance des cultures annuelles afin d'étudier l'impact de chaque scénario d'apport d'eau sur les performances de croissance et de productivité de ladite culture. De même, il faut noter que la géométrie de la zone racinaire considérée dans cette étude pour l'extraction d'eau par les racines du maïs est relativement simple même si les rhizotrons installés ont permis de suivre leur dynamique. Cette géométrie peut être en réalité beaucoup plus complexe car le système racinaire dépend des caractéristiques pédologiques du sol cultivé et de la distribution de l'humidité dans le sol tout ça couronné par un processus dynamique. Cette insuffisance peut également trouver des solutions dans ces

études à mener afin d'établir des scénarii robustes pour la gestion intégrée de l'eau des BCER.

L'étude expérimentale de l'impact des BCER sur la dynamique de la nappe phréatique a montré ses limites au vue de la faiblesse du réseau de piézométrie réalisée. Cependant, l'utilisation de HYDRUS couplée à un modèle hydrogéologique dans d'autres études futures peut améliorer l'étude spatiale de la contribution des BCER partiellement imperméabilisés aux réalimentations des nappes phréatiques sous-jacentes.

La diffusion ou la reproductibilité de la technologie à grande échelle peut constituer également un centre d'intérêt pour les études à venir. Ces études peuvent s'intéresser à l'analyse de l'impact du renforcement des capacités des agents de l'agriculture en conception de bassins et de la mise en place de fonds de garantie pour faciliter l'accès des agriculteurs aux crédits. En outre, la reproductibilité de la technologique peut se heurter à un problème environnemental qu'est la prolifération des moustiques et la modification de l'hydrologie des bassins versants. Ce qui constitue en plus un champ à explorer dans des recherches futures.

REFERENCES

- Abbasi, F., Šimůnek, J., Feyen, J., van Genuchten, M.T., Shouse, P.J., 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. *Transactions of the ASAE*, 46 (4): 1085-1095.
- Abbasi, F., Feyen, J., Van Genuchten, M.T., 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 290 (1-2): 63-79.
- Abbaspour, K.C., Kohler, A., Šimůnek, J., Fritsch, M., Schulin, R., 2001. Application of a two-dimensional model to simulate flow and transport in a macroporous agricultural soil with tile drains. *European Journal of Soil Science*, 52 (3): 433-447.
- Abdou, A., Lebel, T., Amani, A., 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse*, 19 (4): 227-235.
- Abdulkadir, A., Schultz, R.C., 2005. Water harvesting in a runoff-catchment agroforestry system in the drylands of Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 63 (3): 291–298.
- Aboudrare, A., Bouaziz, A., Debaeke, P., 1999. Recherche de stratégies de conduite du tournesol dans les conditions pluviales de la région de Meknès (Maroc). I. Calage et test du modèle EPIC-Phase. *Sécheresse*, 10 (4): 263-271.
- Abu-Awwad, A.M., 1998. Irrigation management in arid areas affected by surface crust. *Agricultural Water Management*, 38(1): 21-32.
- Aerts, J., Lasage, R., Beets, W., de Moel, H., Mutiso, G., Mutiso, S., de Vries, A., 2007. Robustness of sand storage dams under climate change. *Vadose Zone Journal*, 6: 572–580.
- Afouda, A. 1985. Contribution à la représentation mathématique du fonctionnement hydrodynamique des bassins versants. Thèse d'Etat no. 98, INP-Toulouse, France.
- Agarwal, A., Narain, S., 1999. Making water harvesting management everybody's business: water harvesting and rural development in India. The Gatekeepers Series No. SA87. International Institute for Environment and Development, London, United Kingdom.
- AGRA, 2014. Africa Agriculture Status Report: Climate change and smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa. Alliance for a green Revolution for Africa (AGRA), Nairobi, Kenya, 218p.
- Alhassane, A., Salack, S., Ly, M., Lana, I., Traore, S.B., Sarr, B., 2013. Evolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse*, 24 (4): 282-293.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *Irrigation and Drainage*, Paper n°56, FAO, Rome, 333p.

-
- Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon K., O'Halloran, T., 2005. Prediction accuracy for evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131: 24-36.
- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C., Horton, R., 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 467-470.
- Arbat, G., Rosello, A., Domingo Olive, F., J., Puig-Bargues, J., Gonzalez Llinas, E., Duran-Ros, M., Pujol, J., Ramirez de Cartagena, F., 2013. Soil water and nitrate distribution under drip irrigated corn receiving pig slurry. *Agricultural Water Management* 120: 11– 22.
- Arnaud, M., 1985. Contribution à l'étude stochastique markovienne des précipitations dans le bassin Adour- Garonne. Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut national polytechnique de Toulouse.
- Assouline, S., 2002. The effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1630–1636.
- Ati, O., Stigter, C., Oladipo, E., 2002. A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 22 (6): 731–742.
- Bader, J., Latif, M., 2011. The 1983 drought in the West Sahel: a case study. *Climate Dynamics*, 36 (3): 463-472.
- Bado, A., Zongo, I., 2009. Monographie de la région du centre-nord : recensement général de la population et de l'habitation de 2006 (RGPH-2006). Institut national de la statistique et de la démographie, Ouagadougou, Burkina Faso, 175p.
- Balme-Debionne, M., 2004. Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Baron, J., 2004. Dry spell mitigation to upgrade semi-arid rainfed agriculture: water harvesting and soil nutrient management for smallholder maize cultivation in Machakos, Kenya. Doctoral thesis in Natural Resource Management, Department of Systems Ecology Stockholm University, 10691, Sweden, pp.1-38.
- Bastet, G., Bruand, A., Quétin, P., Cousin, I., 1998. "Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): Une analyse bibliographique". *Etude et Gestion des Sols*, 5 (1): 7-28.
- Belbsir, 1990. Irrigation d'appoint et efficience d'utilisation de l'eau en zone semi-aride: cas du blé, Mémoire de 3^{ème} cycle, Option Agronomie, IAV Hassan II, Rabbat.
- Bélières, J.F., Hilhorst, T., Kébé, D., Keïta, M.S., Keïta, S., Sanogo, O., 2011. Irrigation et pauvreté: le cas de l'Office du Niger au Mali. *Cahiers Agricultures*, 20 : 144-149.

-
- Bellassen, V., Manlay, R.J., Chéry, J.-P., Gitz, V., Touré, A., Bernoux, M., Chotte, J.-L., 2010. Multi-criteria spatialization of soil organic carbon sequestration potential from agricultural intensification in Senegal. *Climate Change*, 98 (1-2): 213-243.
- Benbella, M., El Midaoui, M., Errachidi, Y.A., 2003. Valorisation de l'eau d'irrigation de complément chez le blé, revue H.T.E., 127: 21-23.
- Bhatt, V.K., Tiwari, A.K., Yadav, R.P., Sena, D.R., 2012. Augmenting Groundwater Recharge by Water Harvesting Structures in Northwest India. *Hydrology Journal*, 35 (1-2):1-10.
- 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. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47–48: 139–151.
- Birhane, G., Wortmann, C., Mamo, M., Gebrekidan, H., Belay, A., 2006. Micro-basin tillage for grain sorghum production in semiarid areas of Northern Ethiopia. *Agronomy Journal*, 98: 124–128.
- Bloomfield, J. P., Marchant, B. P., 2013. Analysis of groundwater drought using a variant of the Standardized Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10 (6): 7537-7574.
- 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 et Amsterdam, The Netherlands : CILSS et Vrije Universiteit Amsterdam, 63p.
- Bouabagra, M., Souley, Y., 2000. Recherche de techniques d'irrigation adaptées à l'irrigation de complément du blé dans la zone du Gharb. *Hommes terres et eaux*, 116: 52-61.
- Boulier, J.F., Parlange, J.Y., Vauclin, M., Lockington, D.A, Haverkamp, R., 1987. Ponding me limits for arbitrary flux. *Soil Science Society of America*, 51: 424-428.
- Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P., 2007. Water management in irrigated rice: cropping with water scarcity. Los Baños, Laguna: IRRI, 54p.
- Bourguignon, F., Ferreira, F.H.G., Walton, M., 2007. Equity, efficiency and inequality traps: A research agenda. *Journal of Economic Inequality*, 5: 235-256.
- Boyer, J.F., 2002. Logiciel Khronostat d'analyse statistique de séries chronologique, IRD UR2, Programme 21 FRIEND AOC, Equipe Hydrologie UMRGBE. Université de Montpellier II, Ecole des Mines de Paris, France.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27p.
- Brown, O., Crawford, A., 2007. Climate change: A new threat to stability in West Africa? Evidence from Ghana and Burkina Faso. Institut international du développement durable (IIID). *African Security Review*, 17 (3): 39–57.

-
- Burney, J.A., Davis, S.J., Lobell, D.B., 2010. Greenhouse gaz mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 107 (26): 12052-12057.
- Carrera-Hernández, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A., 2012. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452–453:90–101.
- Chabot, R., Bouarfa, S., Zimmer, D., Chaumont, C., Duprez, C., 2002. Sugarcane transpiration with shallow water-table: Sap flow measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54: 17–36.
- Chính, N.V., 2008. From swidden cultivation to fixed farming and settlement: Effects of sedentarization policies among the Khmu in Vietnam. *Journal of Vietnamese Studies*, 3: 44-80.
- Chrichley, W., Reij, C., Seznec, A., 1992. Water Harvesting for Plant Production. Vol II: Case Studies and Conclusions from Sub-Saharan Africa. World Bank Technical Paper Number 157. Washington, D.C., World Bank. 152p.
- Clemmens, A.J., 2002. Measuring and improving irrigation performance at the field level. *Transaction of ASAE*, 22 (8): 89-96.
- Cline, W.R., 2007. Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country, Center for Global Development, Peterson Institute for International Economics.
- Coquet, Y., Boucher, A., Labat, C., Vachier, P., Roger-Estrade, J., 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques: Aspects théoriques et pratiques. *Etude et gestion des sols*, 7 (1): 7-24.
- Coquet, Y., Desbourdes-Coutadeur, C., Vachier, P., Šimůnek, J., Roger-Estrade, J., 2004. Influence de la variabilité spatiale de la structure des sols cultivés sur les transferts de l'eau et de l'ion bromure, *Etude et Gestion des Sols*, 11 (1): 81 -92.
- Cramer, B., 1996. L'eau en péril. *Science et Vie*, 946: 82-85.
- Crevoisier, D., 2005. Modélisation analytique des transferts bi- et tri-directionnels eau-soluté: Application à l'irrigation à la raie et à la micro irrigation. Thèse de Doctorat de l'ENGREF, spécialité sciences de l'eau, Paris, France, 262p.
- Daniel, C., Wood, F.S., 1971. Fitting Equations to Data. Wiley-Interscience, New York.
- Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon - Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tole et de bitume. Par Henry Darcy, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées. Victor Dalmont, Éd., Paris.
- de Vos, J.A., Raats, P.A.C., Feddes, R.A., 2002. Chloride transport in a recently reclaimed Dutch polder. *Journal of Hydrology*, 257 (1-4): 59-77.

- Dembélé, Y., Somé, L., Zomboudre, G., Diabri, S., 1999. Irrigation de complément du riz pluvial sur des sols sableux conditionnés avec de la matière organique au Sud-Ouest du Burkina Faso. *Sécheresse*, 10 (2): 143-149.
- DGPER (Direction Générale pour la Promotion de l'Economie Rurale). 2010. Analyse de la Compétitivité des Filières de Céréales Sèches au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques. Press, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Dia, A., Duponnois, R., 2012. La Grande Muraille Verte: capitalisation des recherches et valorisation de savoirs locaux. IRD Editions.
- Diaw, El Hadji, B., 1996. Modélisation du transfert d'eau en milieu poreux non saturé: application à l'étude de la recharge des nappes d'eaux souterraines en région soudano-sahélienne. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Mécanique des fluides - URA CNRS 854, France, 304p.
- Diouf, M., Nonguierma, A., Abou, A., Royer, A., Somé, B., 2000. Lutte contre la sécheresse au Sahel: résultats, acquis et perspectives au Centre régional AGRHYMET, *Sécheresse*, 11 (4): 257-266.
- Doltra, J., Munoz, P., 2010. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 97: 277–285.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1987. Réponse des rendements à l'eau, *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, 33 : 32-35 et 169-172.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1997. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper*, 24. Rome, Italy, 154p.
- Doto, C.V., Yacouba, H., Niang, D., Lahmar, R., Agbossou, K.E., 2015. Mitigation effect of dry spells in Sahelian rainfed agriculture: case study of supplemental irrigation in Burkina Faso. *African Journal of Agricultural Research*, 10 (16): 1863-1873.
- Downer, C.W., Ogden, F.L., 2004. Appropriate vertical discretization of Richards' equation for two-dimensional watershed-scale modelling. *Hydrological Processes*, 18 (1):1–22.
- du Plessis, J., 2003. Maize production Department of Agriculture and obtainable from Resource Centre Directorate Agricultural Information Services Private Bag X144, Pretoria, 0001 South Africa. 38p.
- du Vachat, E., 2013. Réconcilier l'agriculture et la nutrition : étude de cas sur les politiques agricoles et la nutrition au Burkina Faso. ACF International, Action contre la Faim, 4 rue Niepce - 75662 Paris, Cedex 14, France, 64p.
- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30 (2): 211-223.

- Dutra, E., Giuseppe, F. D., Wetterhall, F., Pappenberger, F., 2013. Seasonal forecasts of droughts in African basins using the Standardized Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (6): 2359-2373.
- El Ghali, A., 1992. Performance de différentes variétés de blé et la résistance à la sécheresse sous irrigation de complément. Mémoire de 3^{ème} cycle, Option Génie Rural, IAV Hassan II, Rabbat.
- Elasha, B.O., Medany, M., Niang-Diop, I., Nyong, T., Tabo, R., Vogel, C., 2006. Background Paper on Impacts, Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Africa, for the African Workshop on Adaptation Implementation of Decision 1/CP10 of the UNFCCC Convention. Accra, Ghana; 54p.
- Eriksen, S.H., Kelly, P.M., 2006. Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* n°12 : 495-524
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., Hadria, R., 2007. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87 (1): 41–54.
- Evet, S.R., 2002. Water and energy balances at soil–plant–atmospheric interfaces. In: *The Soil Physics Companion*, Warrick, A.A. (ed.), CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 127–188.
- Ezui, K.S., 2001. Evaluation et adaptation du modèle QUEFTS dans la prédiction du rendement de l'arachide dans les conditions agro-écologiques du Togo: cas typique de Tsagba, Mémoire d'Ingénieur Agronome, ESA-UL, Lomé, 108p.
- Falkenmark, M., Fox, P., Persson, G., 2001. Water Harvesting for Upgrading of Rainfed Agriculture: Problem Analysis and Research Needs. SIWI Report 11. Stockholm International Water Institute. Sveavägen 59 SE-113 59, Stockholm, Sweden. 94p.
- FAO, 1990. The conservation and rehabilitation of African lands: an international scheme. ARC/90/4. Rome.
- FAO, 1991. A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. FAO, Rome.
- FAO, 1996. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, collection FAO Agriculture, n°29, Rome, Italie.
- FAO, 2001. Water harvesting in western and central Africa, Proceedings of a regional workshop held in Niamey, October 1999, 119p.
- FAO, 2002. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, *collection FAO Agriculture*, 34, 225p.
- FAO, 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres – Enquête AQUASTAT, Rome, 12p.

-
- FAO, 2009. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture – Le point sur l'élevage, Organisation pour l'alimentation et l'Agriculture, Rome, 202p.
- FAO, 2010. Pour une agriculture intelligente face au climat: Politiques, pratiques et financement en matière de sécurité alimentaire, d'atténuation et d'adaptation, Organisation de Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 55p.
- FAO, 2014. FAOSTAT: agricultural production data for Burkina Faso.
- Fatondji, D., Martius C., Vlek, P., 2001. Zai—a traditional technique for land rehabilitation in Niger. *ZEF news* 8:1–2.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York.
- Filali, B.A., 2002. Irrigation d'appoint des céréales : une méthode d'analyse exemple de la région de Meknès, *Revue H.T.E.* n°122.
- Fischer, G., Shah, M., van Velthuisen, H., 2002. "Climate Change and Agricultural Vulnerability, as a contribution to the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, International Institute for Applied System Analysis (IAASA): Remaprint, Vienna, Australia, 160p. <http://adapts.nl/perch/resources/climateagri.pdf>
- Flint, A.L., Flint, L.E., Kwicklis, E.M., Fabryka-Martin, J.T., Bottrarsson, G.S., 2002. Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods. *Hydrogeology Journal*, 10 (1):180-204.
- Fodé, M., Adamou, M., 1993. Analyse des séquences sèches au Niger de 1950 à 1991. Faculté des sciences, département de Physique, Université Abdou Moumouni Niamey, Niger: 189-224.
- Fox, P., Rockström, J., 2000. Water-Harvesting for Supplementary Irrigation of Cereal Crops to Overcome Intra-Seasonal Dry-Spells in the Sahel. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 25 (3): 289-296.
- Fox, P., Rockström, J., 2003. Supplemental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahel. *Agricultural Water Management*, 61: 29–50.
- Fox, P., Rockström, J., Barron, J., 2005. Risk analysis and economic viability of water harvesting for supplemental irrigation in semi-arid Burkina Faso and Kenya. *Agricultural Systems*, 83: 231–250.
- Funk, C., Verdin, J.P., 2010. Real-time decision support systems: The famine early warning system network. In: Satellite rainfall applications for surface hydrology. Chapter 17. Gebremichael, M., Hossain, F. (Eds.) Springer Science & Business Media B.V. DOI 10.1007/978-90-481-2915-7_17.
- Gabriel, K.R., Newman, J., 1962. A markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 88: 90 – 95.

-
- Gardner, W.F., 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.
- Gebregziabhere, T., Nyssen, J., Govaerts, B., Getnet, G., Behailu, M., Haile, M., Dechers, J., 2009. Contour furrows for in-situ soil and water conservation, Tigray, Northern Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 103: 257–264.
- GIEC, 2001a: Climate Change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.G., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (éd.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis, 881p.
- GIEC, 2001b. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, et K.S. White (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis, 1031p.
- GIEC, 2007. « Contribution du Groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'expert sur l'évolution du climat », Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P.J., Hanson, C.E., (éditeurs) dans Bilan 2007 des changements climatiques, Quatrième rapport d'évaluation, Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, en ligne à l'adresse : http://www.ipcc.ch/home_langages_main_french.shtml, 55p.
- GIEC, 2014: Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat [sous la direction de Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L., Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34p.
- Giordano, M., Villholth, K.G., 2007. The Agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development. Wallingford (UK); Colombo (Sri Lanka): CABI ; IWMI, 419p.
- Gleyses, G., Rieu, T., 2004. L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolution. Antony : Cemagref éditions, 61p.
- Goncalves, M.C., Šimůnek, J., Ramos, T.B., Martins, J.C., Neves, M.J., Pires, F.P., 2006. Multicomponent solute transport in soil lysimeters with waters of different quality. *Water Resources Research*, 42 (8):1-17.
- Granier, A., Badeau, V., Bréda, N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, XLVII: 59-68.

-
- Gribb, M.M., Sewell, G., 1998. Solution of ground water flow problems with general purpose and special purpose computer codes. *Ground Water*, 36 (2): 366-372.
- Guèye, M., Sivakumar, M.V.K., 1992. Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal. Compte rendu des travaux n°2. Niamey; Niger: Centre sahélien de l'ICRISAT, 42p.
- Guissou, R., Ilboudo, F., Palé, R., Haoua, C., Kouanda, A., 2012. Analyse des incitations et pénalisations pour le maïs au Burkina Faso. Série notes techniques, SPAAA, FAO, Rome.
- Habtamu, G., 1999. Rainwater harvesting concepts and issues. Paper presented at the founding conference of the Ethiopian Rainwater Harvesting Association (ERHA, Addis Ababa, Ethiopia.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., 2013. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'Oued Mina (nord-ouest d'Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 26 (1) : 33-38.
- Hamatan, M., Mahe, G., Servat, E., Paturel, J-M., Amani, A., 2004. Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 15 (3) : 1-8.
- Hamed, K., Rao, R., 2000. Flood frequency analysis. CRC press. Boca Raton, Floride, USA, 50p.
- Hansen, J.W., Baethgen, W., Osgood, D., Ceccato, P., Ngugi, R.K., 2007. Innovation in climate risk management: protecting and building rural livelihoods in a variable and changing climate, *Journal of Semi-Arid Tropical Agricultural Research* vol., 4, n°1 (www.icrisat.org/journal/specialproject.htm), 55p.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., de Wit, J., Haile, M., Govers, G., Deckers, S., 2006. Reservoirs in Tigray (northern Ethiopia): characteristics and sediment deposition problems. *Land Degradation and Development*, 17 (2): 211–230.
- Hatibu, N., Mahoo, F., 2000. Rainwater harvesting for natural resources management. A planning guide for Tanzania. RELMA Technical Handbook, no.22, 156p.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30 (11): 2931-2935.
- Haziza, D., 2005. Inférence en présence d'imputation simple dans les enquêtes: un survol. *Journal de la société française de statistique*, 146 (4): 69-118.
- Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using ground-water levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (1):91–109.
- Hergert, G.W., Wortmann, C.S., 2006. Using starter fertilizers for corn, grain sorghum and soybeans. NebGuide G361. Univ. of Nebraska Coop. Ext. Service, Lincoln.
- Hillel, D., 1974. L'eau et le sol principe et processus physiques, Vander ED, 288p.

-
- Hills, R.C., Morgan, J.H.T., 1981. Rainfall statistic: An interactive approach to analysing rainfall records for agricultural purpose. *Experimental Agriculture*, 17: 1-16.
- Hong-Yong, S., Chang-Ming, L., Xi-Ying, Z., Yan-Jun, S., Yong-Qiang, Z., 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural water management*, 85 (1-2): 211-218.
- Hut, R., Ertsen, M., Joeman, N., Vergeer, N., Winsemius, H., de Giesen, N., 2008. Effects of sand storage dams on groundwater levels with examples from Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33 (1-2): 56–66.
- 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 Nakambé. Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France, 245p.
- ICN2, 2014. Second International conference on Nutrition: better nutrition, better lives, 19-21 November, Rome, Italy.
http://www.fao.org/about/meetings/icn2/en/?utm_source=faohomepage&utm_medium=web&utm_campaign=topbanner. Downloaded 28/11/2014.
- Ingram, K.T., Roncoli, M.C., Kirshen, P.H., 2002. Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina-Faso as a case study. *Agricultural System*, 74: 331-349.
- Inoue, M., Šimůnek, J., Shiozawa, S., Hopmans, J.W., 2000. Simultaneous estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Advances in Water Resources*, 23 (7): 677-688.
- INSD, 2009. Annuaire statistique 2008, Burkina Faso, 143p.
- Intizar, H., Muni, A.H., 2004. Irrigation and poverty alleviation: review of the empirical evidence. *Irrigation and Drainage*, 53: 1-15.
- Istanbulluoglu, A., Kocaman, I., Konukcu, F., 2002. Water use production relationship of maize under Tekirdag conditions in Turkey. *Pakistan Journal of Biology Sciences*, 5 (3): 287-291.
- Jacques, D., Šimůnek, J., Timmerman, A., Feyen, J., 2002. Calibration of Richards' and convection-dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 259 (1-4): 15-31.
- Jamin, J.Y., 1994. De la norme à la diversité : l'intensification rizicole face à la diversité paysanne dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger. Thèse de doctorat, Institut national agronomique de Paris-Grignon, Paris, 402p.
- Jamin, J.Y., Bouarfa, S., Poussin, J.C., Garin, P., 2011. Les agricultures irriguées face à de nouveaux défis. *Cahiers Agricultures*, 20: 10-15.

-
- Jones, P.G., Thornton, P.K., 2008. Croppers to livestock keepers: livelihood transitions to 2050 in Africa due to climate change. *Environmental Science and Policy*, 12 (4): 427-437.
- Jordan, M.O., 1987. Mise en place du système racinaire du maïs. II- Importance de quelques paramètres relatifs aux conditions de milieu. *Agronomie*, 7(7) : 457-465.
- Jourdain, D., Rakotofiringa, A., Quang, D.D., Valony, M.J., Vidal, R., Jamin, J.Y., 2011. Gestion de l'irrigation dans les montagnes du Nord du Vietnam : vers une autonomie accrue des irrigants. *Cahiers Agricultures*, 20: 78-84.
- Kanohin, F., Saley, M.B., Savane, I., 2009. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zones tropicale humide: cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 26 (2): 209-222.
- Karambiri, H., Garcia Galiano, S.G., Giraldo, J.D., 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 Science Letter*, 12 (1): 109-115.
- Kaushal, M.P., 2009. Groundwater Recharge Technologies. *Journal of Crop Improvement*, 23 (1): 83–93.
- Kébé, D., Sanogo, O., Bélières, J.F., Keita, M.S., Keita, S., Hilhorst, T., 2005. Evaluation de la pauvreté en zone Office du Niger. Rapport Final. Bamako, Institut d'économie rurale.
- Kiepe, P., 1995. No runoff, no soil loss: soil and water conservation in hedgerow barrier systems. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, Netherlands, 156p.
- Kini, J., 2007. Analyse des déterminants de l'adoption des technologies de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou.
- Kosugi, K., 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32 (9): 2697-2703.
- Kouassi, A.M., Kouame, K.F., Saley, M.B., Biemi, J. 2013. Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'ouest: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 16 : 121-138.
- Kumar, C.P., 2012. Assessment of groundwater potential. *International Journal of Engineering Science*, 1 (1):64-79.
- Kuper, M., Bouarfa, S., Errahj, M., Faysse, N., Hammani, A., Hartani, T., Marlet, S., Zairi, A., Bahri, A., Debbah, A., Garin, P., Jamin J-Y., Vincent, B I., 2009. A crop needs more than a drop: towards a new praxis in irrigation management in North Africa. *Journal of International Commission on Irrigation and Drainage*, 58 (S3): 231-239.
- Lane, A., Jarvis, A., 2007. Changes in climate will modify the geography of crop suitability: Agricultural biodiversity can help with adaptation. *Journal of the Semi-Arid Tropical Agricultural Research*, 4(1): 1-12.

- Liniger, H.P., Mekdaschi Studer, R., Hauert, C. Gurtner, M., 2011. La pratique de la gestion durable des terres. Directives et bonnes pratiques en Afrique subsaharienne. TerrAfrica, Panorama mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT) et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 252p.
- Logsdon, S.D., Jaynes, D.B., 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometer. *Soil Science. Society of America Journal*, 57: 1426-1431.
- MAHRH, 2011. Cadre d'action pour l'investissement agricole au Burkina Faso, 98p.
- Mailhol, J.C., 2003. Validation of a predictive form of Horton infiltration for simulating furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (6): 412-421.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., Walser, S., Schutze, N., Dejean, C., 2011. Analysis of AET and yield predictions under surface and buried drip irrigation systems using the Crop Model PILOTE and Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 98 (6): 1033–1044.
- Makurira, H., Mul, M.L., Vyagusa, N.F., Uhlenbrook, S., Savenije, H.H.G., 2007. Evaluation of community-driven smallholder irrigation in dry land South Pare Mountains, Tanzania; a case study of Manoo micro-dam. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32 (15-18): 1090–1097.
- Malley, Z.J.U., Kayombo, B., Willcocks, T.J., Mtakwa, P.W., 2004. Ngoro :an indigenous, sustainable and profitable soil, water and nutrient conservation system in Tanzania for sloping land. *Soil and Tillage Research*, 77 (1): 47–58.
- MARHASA, 2014. Annuaire des statistiques agricoles 2013. Direction Générale des Etudes Statistiques Sectorielles (DGESS), Ouagadougou, Burkina Faso, 228p.
- Mariko, D., Chohin-Kuper, A., Kelly, V., 2001. Libéralisation et dévaluation du franc CFA: la relance de la filière riz irrigué à l'Office du Niger au Mali ? *Cahiers Agricultures*, 10: 173-184.
- Marquardt, D.W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431-441.
- Mathlouthi, M., Lebdi, F., 2009. Analyse statistique des séquences sèches dans un bassin du nord de la Tunisie. *Hydrological Science Journal*, 54 (3): 442-455.
- Mathlouthi, M., Lebdi, F., 2015. Identification hydrologique des événements secs extrêmes dans le bassin d'Ichkeul (Tunisie). Hydrological Sciences and Water Security: Past, Present and Future (Proceedings of the 11th Kovacs Colloquium, Paris, France, June 2014). IAHS Publications, 366.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993. Boston. *American Meteorological Society*, 179–184.

- Mekliche, A., Boukecha, D., Hanifi-Meklich, L., 2003. Etude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Effet de l'irrigation de complément sur les caractères phénologiques, morphologiques et physiologiques. *Anales de l'Institut National Agronomique-El-Harrach*, 24 (1-2): 97-110.
- Merabet, B.A., Boutiba, A., 2005. L'irrigation de complément du blé dur. Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semi-aride d'Algérie. *Sciences and Technologie C*, 23: 72-79.
- Mishra, S., Parker, J.C., 1989. Parameter estimation for coupled unsaturated flow and transport. *Water Resources Research*, 25 (3): 385-396.
- Mmolawa, K., Or, D., 2003. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (6): 1657–1671.
- Moeletsi, M.E., Wlaker S., 2012. A simple agroclimatis index to delineate suitable growing areas for rainfed maize production in the Free State Province of South Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162-163: 63-70.
- Moeletsi, M.E., Wlaker, S., Landman, W.A., 2011. ENSO and implication on rainfall characteristics with reference to maize production in the Free State Province of South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36 (14-15): 715-726.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50 (3): 885-900.
- Mostofa Amin, M.G., Šimůnek, J., Lægdsmand, M., 2014. Simulation of the redistribution and fate of contaminants from soil-injected animal Slurry. *Agricultural Water Management*, 131: 17-29.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12 (3):513-522.
- Mupangwa, W., Love, D., Twomlow, S., 2006. Soil–water conservation and rainwater harvesting strategies in the semi-arid Mzingwane Catchment, Limpopo Basin, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31 (15-16): 893–900.
- Musy, A., Soutter, M., 1991. Physique du sol. 1^{ère} éd. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Centre Midi, CH-10-15, Lausanne-Suisse, 335p.
- Mwenge Kahinda, J., Taigbenu, A.E., Boroto, R.J., 2010. Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35 (13-14): 742-751.
- Neal, J.S., Fulkerson, W.J. Sutton, B.G., 2011. Differences in water-use efficiency among perennial forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. *Irrigation Science*, 29 (3): 213–232.

-
- Nelson, G.C., Rosegrant, M.W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., Lee, D., 2009. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. Food Policy Report 21. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- NEPAD-OCDE, 2011. Initiative sur l'investissement en Afrique-Revue des politiques de l'investissement agricole du Burkina Faso, Synthèses des résultats et des recommandations, Dakar, Sénégal, 14p.
- Newman, S.P., 1975. Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media. In: Gallagher, R.H., Oden, J.T., Taylor, C., Zienkiewicz, O.C., eds., "Finite Elements in Fluids, Vol.1: Viscous Flow and Hydrodynamics." John Willey, London.
- Ngigi, S.N., Savenije, H.H.G., Rockstrom, J., Gachene, C.K., 2005. Hydro-economic evaluation of rainwater harvesting and management technologies: farmers' investment options and risks in semi-arid Laikipia district of Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30 (11-16) : 772–782.
- Niang, D., 2006. Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel burkinabè. Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne, Suisse, thèse n°3667, 167p.
- 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. *Journal of Soil Science Environmental Management*. 3 (12): 297-307.
- Niasse, M., Afouda, A., Amani, A., 2004. Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. Gland, Switzerland ; Cambridge, UICN, 71p.
- Nicholson, S.E., 1983. Sub-Saharan Rainfall in the years 1976-1980. Evidence of continued drought. *Monthly Weather Review*, 111 (8): 1646-1654.
- Nicholson, S.E., 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research*, 17:123-144.
- Nicholson, S.E., Kim, J., 1997. The relationship of the el nino–southern oscillation to African rainfall *International journal of climatology*, 17, 117–135.
- Nyssen, J., Govaerts, B., Araya, T., Cornelis, W.M., Bauer, H., Haile, M., Sayre, K., Deckers, J., 2011. The use of the marasha ard plough for conservation agriculture in Northern Ethiopia. *Agronomy for Sustainable Development*, 31: 287–297.
- OMM (2012). Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations. OMM-N° 1090, Genève, Suisse, 25p.

- Ouédraogo, M., Dembélé, Y., Somé, L., 2010. Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso, *Sécheresse*, 21 (2) : 87-96.
- Pallo, F.J-P., Asimi, S., Assa, A., Sedogo, P.M., Sawadogo, N., 2006. Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. *Etude Gestion des Sols*, 13 (4): 289-304.
- Palmer, W. C., 1965. Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Research Paper 45, 58p.
- Pang, L., Close, M.E., Watt J.P.C., Vincent, K.W., 2000. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D. *Journal of Contaminant Hydrology*, 44 (1): 19-46.
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34 (15): 3998-4006.
- Payero, J.O., Tarkalson, D.D., Irmak, S., Davison, D., Petersen, J.L., 2009. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agricultural Water Management*, 96 (10): 1387–1397.
- Perret, S., 2006. Climate change and African agriculture. Center for Environmental Economics and Policy in Africa (CEEPA), University of Pretoria; South Africa, Policy Note 36, 6p. <http://www.ceepa.co.za/uploads/files/POLICY%20NOTE%2036.pdf>
- Philip, J.R., 1969. Theory of infiltration. *Advances Hydroscience*, 5: 215-296.
- Philip, J.R., 1985. Reply to Comments on steady infiltration from spherical cavities. *Soil Science Society of America Journal*, 19: 788-789.
- Planchon, V., 2005. Traitement des valeurs aberrantes : concepts actuels et tendances générales. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 9 (1): 19–34
- Pullan, A.J., 1990. The quasilinear approximation for unsaturated porous media flow. *Water Resources Research*, 26: 1219-1234.
- Qureshi, M.E., Whitten, S.M., Mainuddin, M., Marvanek, S., Elmahdi, A., 2013. A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia. *Environmental Modelling and Software*, 41: 98-106.
- Ramel, R., 2005. Impact des processus de surface sur le climat en Afrique de l'Ouest, PhD thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble, France, 149p.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L., Pereira, L.S., 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of Hydrology*, 407 (1-4): 129–144.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Pereira, L.S., 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111: 87–104.

-
- Razali, N.M., Wah Y.B., 2011. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1):21-33.
- Reij, C., Scoones, I., Toulmin, C., 1996. *Sustaining the Soil: Indigenous Soil and Water Conservation in Africa*. Earthscan, London.
- Reij, C., Tappan, G. Smale, M., 2009. Agricultural transformation in the Sahel: Another kind of "Green Revolution." IFPRI Discussion Paper n° 00914 (www.ifpri.org/millionsfed).
- Rey, J., 1996. Apport de la gestion industrielle au management des périmètres irrigués: Comment mieux piloter la production ? Thèse de doctorat en Ingénierie et Gestion, ENSMP-CEMAGREF-IIMI, 198p.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 633-639.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, 1: 318-333.
- Richard, R., Heim, J.R., 2002. A Review of Twentieth- Century Drought Indices Used in the United States. *American Meteorological Society*, 1149-1165.
- Riou, C., 1998. L'eau et l'agriculture : pourra-t-on éviter une crise ? *Cahiers Agricultures*, 8: 295-300.
- Roberts, T., White, S.A., Warrick, A.W., Thompson, T.L., 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 95: 669–677.
- Roberts, T., Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Thompson, T.L., 2009. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (1): 233–240.
- Rockstrom, J., Barron, J., Fox, P., 2002. Rainwater management for increased productivity among small-holder farmers in drought prone environments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27 (11-22): 949-959.
- Rockstrom, J., Kaumbutho, P., Mwalley, J., Nzabi, A.W., Temesgen, M., Mawenya, L., Barron, J., Mutua, J., Damgaard-Larsen, S., 2009. Conservation farming strategies in East and Southern Africa: yields and rain water productivity from on-farm action research. *Soil and Tillage Research*, 103 (1): 23–32.
- Romero, R., Guijarro, J., Alonso, S., 1998. A 30 year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology*, 18: 541- 560
- Roose, E., 1993. Innovations dans la conservation et la restauration des sols. *Cahier ORSTOM Pédologie*, 28 (2): 147-156.

-
- Roose, E., Kabore, V., Guenat, C., 1995. Le zaï: fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). Cahier ORSTOM Pédologie. In spéciale érosion: réhabilitation des sols et GCES: 158-173.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., Fernando, R.M., Pereira, L.S., Allen, R.G., 2012a. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103: 8–24.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., Alves, I., Fernando, R.M., Pereira, L.S., Allen, R.G., 2012b. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing. *Agricultural Water Management*, 103: 62–77.
- Roudier, P., 2008. Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique : approche par indicateurs. Mémoire de Master 2 risques naturels, IRD, Montpellier, France, 73p.
- Rutashobya, D.G., 2008. Climate change scenarios. Impacts and adaptation strategies in Africa. In: Petermann, T. (Ed.), *Towards Climate Change*
- Sanou, J., 2007. Fiche technique de production de maïs de consommation. Variété extra précoce Barka. CNRST/IN.E.R./DPV/CT, 1p.
- Sarr, B., Diouf, O., Diouf, M., Roy-Macauley, H., 1999. Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. *Sécheresse*, 10 (2): 129-135.
- Sarr, B., Issaka, L., 2009. Les fortes pluies et les inondations enregistrées au Sahel au cours de l'hivernage 2007: variabilité et/ou changement climatique. 14^{ème} Colloque International, SIFEE « Changement climatique et évaluation Environnementale » Outils et enjeux pour l'évaluation des impacts et l'élaboration des plans d'adaptation, Niamey.
- Sarr, B., Kafando, L., Atta, S., 2011. Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (4):1659-1675.
- Sarr, B., 2012. Present and future climate change in the semi-arid region of West Africa: A crucial input for practical adaptation in agriculture. *Atmospheric Science Letters*, 13 (2): 108-112.
- Sarr, B., Atta, S., Kafando, L., 2012. Revue des indices climatiques utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indiciaires en Afrique. *Sécheresse*, 23: 255–60.
- Sarr, B., Atta, S., Ly, M., Salack, S., Ourback, T., Subsol, S., Alan George D., 2015. Adapting to climate variability and change in smallholder farming communities: A case study from Burkina Faso, Chad and Niger (CVCADAPT). *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 7 (1): 16-27.

-
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfert functions, *Journal of Hydrology*, 251 (3-4): 163-176.
- Scher, S.J., Shames, S., Friedman, R., 2012. From climate-smart agriculture to climate-smart landscapes. A review. *Agriculture and Food Security*, 1-12.
- Šejna, M., Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., 2014. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media. User Manual, Version 2.04, PC Progress, Prague, Czech Republic. 307p.
- Semde, A., 2004. Ministère de l'agriculture de l'hydraulique et des ressources halieutiques, Etudes morpho-pédologiques des provinces du Yatenga, du Loroum et du Zandoma, Bureau national des sols, Rapport technique n°122, Ouagadougou.
- Servat, T.E., Paturel, J.E., Lubes, H., Kouame, B., Ouedraogo, M., Masson, J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191 (1-4): 1-15.
- Shah, T., 2007. The groundwater economy of South-Asia: An assessment of size, significance and socio-ecological impacts. In : Giordano M, Villholth KG, eds.2007. The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development. Wallingford (UK); Colombo (Sri Lanka): CABI; IWMI, 419p.
- Sharda, V.N., Kurothe, R.S., Sena, D.R., Pande, V.C., Tiwari, S.P., 2006. Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India. *Journal of Hydrology*, 329 (1-2): 224– 243.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., 1994. The CHAIN_2D code for simulating two-dimensional movement of water flow, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Version 1.1. Res. Rep. 136. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Šimůnek, J., Huang, K., van Genuchten, M.Th., 1995. The SWMS_3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variably saturated media. Version 1.0. Res. Rep. 139. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Šimůnek, J., Nimmo, J.R., 2005. Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique. *Water Resources Research*, 41 (4): 1-9, W04015, doi:10.1029/2004WR003379
- Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably- Saturated Media, User Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 241p.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th., 2008a. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and

-
- Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Version 4.0. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, California, 323p.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2008b. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7:587–600.
- Šimůnek, J., Hopmans, J.W., 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling*, 220 (4): 505–521.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2012. The HYDRUS Software Package for Simulating the two-and three-Dimensional Movement of Water Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical manual Version 2.0. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. California, 260p.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th., 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.16, Department Of Environmental Sciences University Of California Riverside Riverside, California, 340p.
- Singh, J., Knapp, H.V., Demissie, M. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT.ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Available at: <http://swat.tamu.edu/media/90101/singh.pdf>
- 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): 119-125.
- Sivakumar, M., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42 (4): 295–305.
- Sivakumar, M.V.K., Maidoukia, A., Stern, R.D., 1993. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : Le Niger. 2ème édit. ICRISAT. Bulletin information, n°5, DMN. Niger. 107p.
- SIWI, 2001. Water harvesting for upgrading rainfed agriculture: Problem analysis and research needs. SIWI report II, Stockholm, Sweden, 101p.
- Siyal, A.A., Bristow K.L., Šimůnek, J., 2012. Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies, *Agricultural Water Management*, 115: 242– 251.
- Siyal, A.A., van Genuchten, M.Th., Skaggs, T.H., 2009. Performance of pitcher irrigation systems. *Soil Science*, 174 (6), 312–320.
- Siyal, A.A., Skaggs, T.H., 2009. Measured and simulated wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96 (6), 893–904.

-
- Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., Shouse, P.J., Poss, J.A., 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management*, 86 (1-2): 140–149.
- Smadhi, D., Zella, L., 2012. The pluviometrical deficiencies in the pluvial cereal regions in Algeria. *African Journal of Agricultural Research*, 7 (48): 6413-6420.
- Small, E., 2005. Climatic controls on diffuse groundwater recharge in semiarid environments of the southwestern United States. *Water Resources Research*, 41 (4):1-17.
- Smerdon, B.D., Mendoza, C.A., Devito, K.J., 2008. The influence of sub-humid climate and water table depth on groundwater recharge in shallow outwash deposits. *Water Resources Research*, 44(8):1–15.
- Smettem, K.R.J., Ross, P.J., Haverkamp, R., Parlange, J.Y., 1995. Three dimensional analysis of infiltration from the disk infiltrometer. 3. Parameter estimation using a double disk tension infiltrometer. *Water Resources Research*, 31: 2491-2495
- Somé, L., 1989. Diagnostic agropédologique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse de Doctorat, Sciences et Techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 349p.
- Somé, L., Sivakumar, M.V.K., 1994. Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Burkina Faso. Compte rendu des travaux n°1 : Division du sol et Agroclimatologie. INERA, Burkina Faso, 43pp.
- Somé, L., Ouattara, K., 2005. Irrigation de complément pour améliorer la culture du sorgho au Burkina Faso. *Agronomie Africaine*, 17 (3): 201-209.
- Sommer, R., Folster, H., Vielhauer, K., Carvalho, E.J.M., Vlek, P.L.G., 2003. Deep soil water dynamics and depletion by secondary vegetation in the eastern Amazon. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1672–1686.
- Soltner, D., 1989. Les bases de la production végétale; le sol- le climat- la plante. Tome1-le sol, 14^{ième} Ed. France, 463p.
- Sophocleous, M., 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10 (1): 52–67.
- Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A., 2007. Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 294p
- Spaan, W., 2003. Consuming the savings: water conservation in a vegetation barrier system at the Central Plateau in Burkina Faso. *Tropical Resources Management Papers* 42, 14p.
- Stamm, C., Sermet, R., Leuenberger, J., Wunderli, H., Wydler, H., Fluhler, H., Gehre, M., 2002. "Multiple tracing of fast solute transport in a drained grassland soil". *Geoderma*, 109 (3-4): 245-268.
- Stern, R., Rijks, D., Dale, I., Knock, J., 2006. Instat climatic guide. First version, 330p.

-
- Stern, R.D., Cooper, P.M.J., 2011. Assessing climate risk and climate change using rainfall data: a case study from Zambia. *Experimental Agriculture*, 47 (2): 241-266.
- Tadross, M.A., Hewitson, B.C., Usman, M.T., 2005. The interannual variability of the onset of the maize growing season over South Africa and Zimbabwe. *Journal of Climate*, 18 (16): 3356-3372.
- Tafteh, A., Sepaskhah, A., R., 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management*, 113: 19– 29.
- Tamini, T.H.D., 2002. Transfert d'eau et de nitrates sous culture maraîchère irriguée en zone tropicale semi-aride. Conséquences agronomiques et environnementales. Thèse n° 2697, EPFL, Lausanne, Suisse, 265p.
- Tardieu, F., Katerji, N., Berthenod, O., 1990. Relation entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie*, 1: 617-626.
- Temesgen, M., 2007. Conservation Tillage Systems and Water Productivity Implications for Smallholder Farmers in Semi-arid Ethiopia. PhD thesis. Taylor & Francis/Balkema, Leiden, The Netherlands.
- Tesfai, M., Stroosnijder, L., 2001. The Eritrean spate irrigation system. *Agricultural Water Management*, 48 (1): 51–60.
- Thirriot, C., 1986. Simplicité et efficacité des chaînes de Markov comme modèle de la pluviométrie. *Arch Hydrotherapy*, 23: 1-2.
- Thornton, P.K., Jones, P.G., Ericksen, P.J., Challinor, A.J., 2011. Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4°C+ world. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 369 (1934), 117–136.
- Tiffen, M., Mortimore, M., Gichuki, F., 1994. More people less erosion: Environmental recovery in Kenya. London, John Wiley & Sons Ltd, 326p.
- Tubiello, F.N., Salvatore, M., Córdor Golec, R.D., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., Federici, S., Jacobs, H., Flammini, A., 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. FAO Statistics Division Working Paper Series ESS/14- 02. Rome, Italy: FAO, .89p.
- U.S. EPA, 2012. Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2030. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA).
- van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (5): 892-898.
- van Genuchten, M.Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

-
- van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC Code for quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0., EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 93p.
- Vandervaere, J.P., 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie à disques. Analyse critique des régimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroutés. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble I, LTHE, Grenoble, 329 p.
- Vandervaere, J.P., Vauclin, M., Elrick, D.E., 2000a. Transient flow from tension infiltrimeters. Part 1. The two-parameters equation. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1264-1272.
- Vandervaere, J.P., Vauclin, M., Elrick, D.E., 2000b. Transient flow from tension infiltrimeters. Part 2. Four methods to determine sorptivity and conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1273-1284.
- Vauclin, M., Chopart, J.L., 1992. L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *Agronomie Tropicale*, 46: 259-271.
- Velazquez, E., 2007. Water trade in Andalusia: Virtual water: An alternative way to manage water use. *Ecological Economics*, 63 (1): 201-208.
- Ventrella, D., Mohanty, B.P., Šimůnek, J., Losavio, N., van Genuchten, M.Th., 2000. Water and chloride transport in a fine-textured soil: Field experiments and modeling. *Soil Science*, 165: 624–631.
- Vien, T.D., 2003. Culture, environment, and farming systems in Vietnam's northern mountain region. *Southeast Asian Studies*, 41: 180-205.
- Vogel, T., Císlerová, M., 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, *Transport in Porous Media*, 3: 1-15.
- Vogel, H.J., Ippisch, O., 2008. Estimation of a critical spatial discretization limit for solving Richards' equation at large scales. *Vadose Zone Journal*, 7(1):112-114.
- Wang, T., Zlotnik, V.A., Šimunek, J., Schaap, M.G., 2009. Using pedotransfer functions in vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions. *Water Resources Research*, 45 (4):1-12.
- Wang, Y.M., Traore, S., Kerh, T., 2009. Applying evapotranspiration reference model and rainfall contribution index for agricultural water management Plan in Burkina Faso. *African Journal of Agricultural Research*, 4, 1493-1504.
- Warrick, A.W., Broadbridge, P., 1992. Sorptivity and macroscopic capillary length relationships. *Water Resources Research*, 28: 427-431.

-
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., 1998. The regional Impacts of Climatic Change: an Assessment of Vulnerability. A special report of IPCC Working group. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York.
- Wey, J. 1998. Etude de la variabilité du rendement du maïs au Burkina Faso. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 200p.
- White, I., Sully, M.J., 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research*, 23: 1514-1522.
- Wiggins, S., 2009. Can the smallholder model deliver poverty reduction and food security for a rapidly growing population in Africa? Paper for the Expert Meeting on How to feed the World in 2050, Rome.
- Wiggins, S., Sharda, K., 2013. Looking back, peering forward: what has been learned from the food-price spike of 2007–2008?
- Wisseling, J.G., Elbers, J.A., Kabat, P., van den Broek, B.J., 1991. SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, Netherlands.
- Woldearegay, K., 2002. Surface water harvesting and groundwater recharge with implications to conjunctive water resource management in arid to semi-arid environments (with a model site of the Mekelle area, northern Ethiopia). Addis Ababa, Ethiopia.
- Wondimkun, Y., Tefera, M., 2006. Household water harvesting and small scale irrigation schemes in Amhara Region: best practices and technologies for small- scale agricultural water management in Ethiopia. In: Proceedings of a MoARD/ MoWR/USAID/IWMI Symposium and Exhibition Held, 7–9 March, Addis Ababa, Ethiopia.
- Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, 4:1259-1273.
- World Bank, 2008. Rapport sur le développement dans le monde: L'agriculture au service du développement, Washington, D.C., The States.
- World Bank, 2013. Turn down the heart: Climate extremes, regional impacts and the case for resilience. Washington, D.C., USA
- WRI, 2014. World resources report 2013-2014: Creating a sustainable food future, Washington, DC: USA
- Zhang, Y., Sun, J.S., Dua, A.W., Wang, J.L., Shen, X.J., Liu, X. F., 2007. Effects of different planting patterns on water use and yield performance of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, 92 (1-2): 41–47.
- Zhu, Q., Li, Y., 2000. A breakthrough of the dry farming- rain water harvesting irrigation project in the Gansun China. Paper presented at the Stockholm Water Symposium, 2000. SIWI, Stockholm.
- Zongo, B., 2015. Stratégies innovantes d'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Sahel : Cas de l'irrigation de complément et de l'information climatique dans

-
- les exploitations agricoles du Burkina Faso. Thèse de doctorat, sciences et technologies de l'eau, de l'énergie et de l'environnement, 2IE, Ouagadougou, Burkina Faso (en instance de soutenance).
- Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T., 2015. Farmers' practices and willingness to adopt supplemental irrigation in Burkina Faso. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, 3 (1): 101-117
- Zougmore, R., Zida, Z., Kambou, N.F., 1999. Réhabilitation des sols dégradés: rôles des amendements dans le succès des techniques de demi-lune et de zaï au Sahel. *Bulletin Réseau Erosion*, 19: 436-450.
- Zoungrana, C., 2003. Pauvreté et conservation des sols au Burkina Faso, Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou.
- Zwart, S.J., Bastiaansen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69 (2): 115-133.

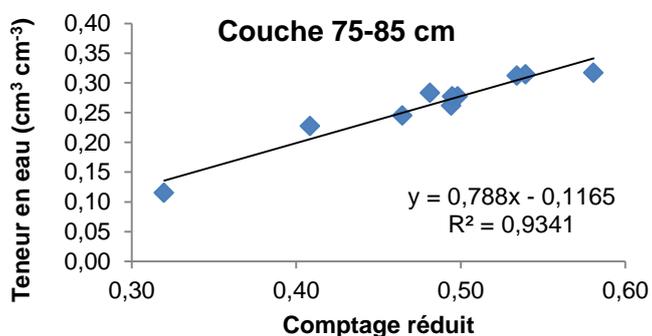
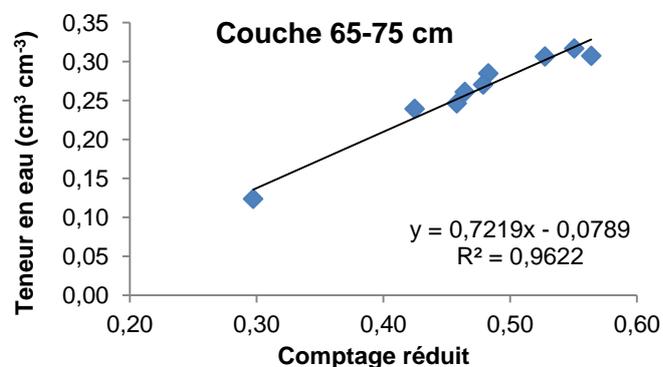
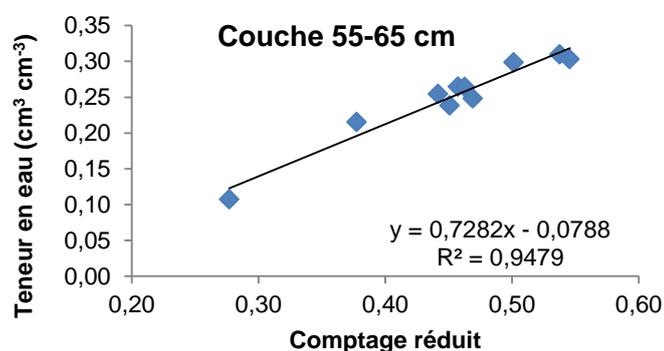
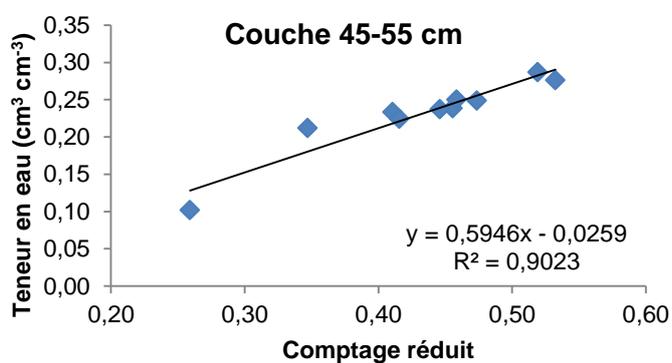
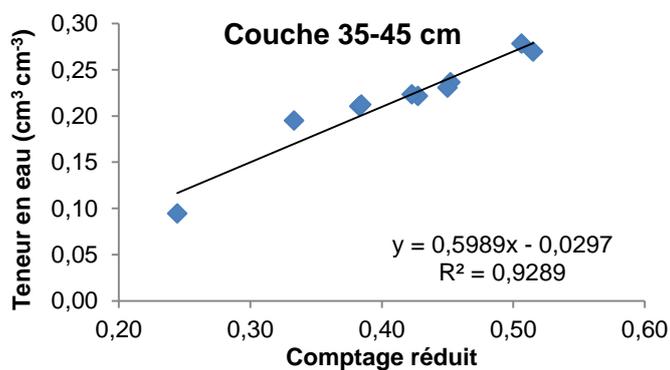
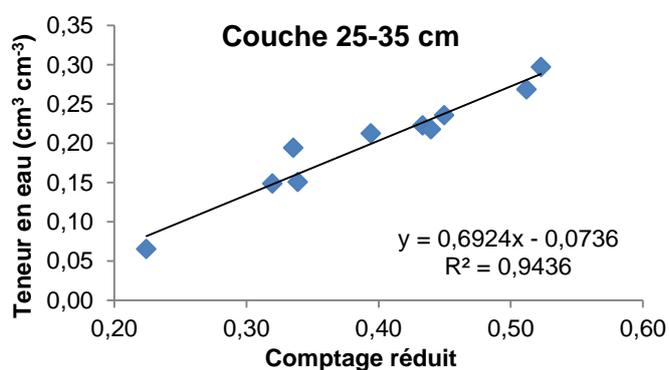
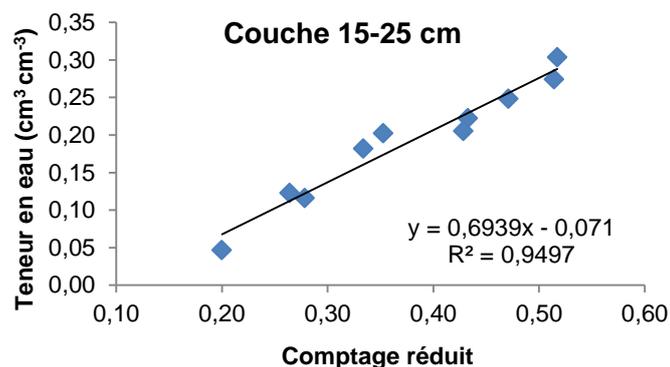
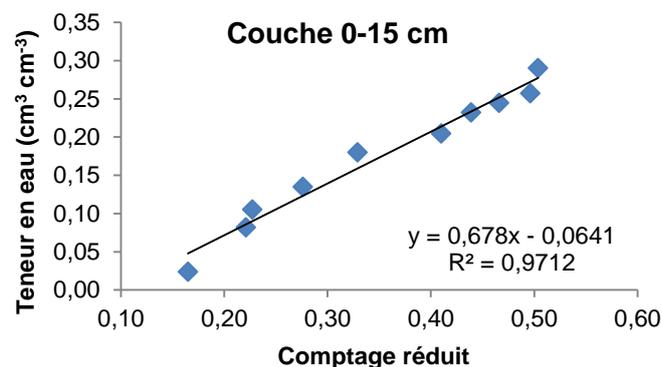
ANNEXES

Annexe 1 : Comparaison des modèles de simulation des transferts d'eau dans le sol

Modèle	Version	Système d'exploitation	Dimension	Brève description
SOILCO2	1.0	DOS	1	Variably saturated water flow and transport of CO ₂ in porous media; modified van Genuchten (MVG)
UNSATCHEM	2.0	Windows	1	Variably saturated water flow and transport of major ions and CO ₂ in porous media; MVG; 16 bit graphical user interface (GUI)
CHAIN_2D	1.0	DOS	2	Version 2.0 of SWMS_2D + nonlinear solute transport; sequential first-order decay chains; gas diffusion; two-site sorption model; temperature dependence of soil hydraulic and solute transport parameters; predecessor of the 2.0 version of HYDRUS-2D
SWMS_3D	1.0	DOS	3	Variably saturated water flow and solute transport in porous media; root water and solute uptake; MVG; linear solute transport; iterative solvers for the system of linear equations; predecessor of the 1.0 version of HYDRUS (2D/3D)
HYDRUS (2D/3D)	1.0	Windows	2, 3	HYDRUS-2D (2.0) + SWMS_3D + 32 bit GUI; two- and three dimensional variably saturated water flow and solute transport in porous media; VG, MVG, Durner (1994), and Kosugi (1996) soil hydraulic property models; hysteresis in soil hydraulic properties; nonlinear solute transport; sequential first-order decay chains; gas diffusion; temperature dependence of soil hydraulic and solute transport parameters; two-site sorption model; dual-porosity mobile-immobile water flow; virus, colloid, and bacteria transport; constructed wetland module

Source : Šimůnek et al. (2008b)

Annexe 2 : Courbes d'étalonnage par couche de 10 cm



Annexe 3 : Test de Pettitt sur les caractéristiques de la longueur de la campagne

Hypothèse testé :	Seuil de probabilité (%)		
	90	95	99
Absence de rupture	Acceptée	Acceptée	Acceptée

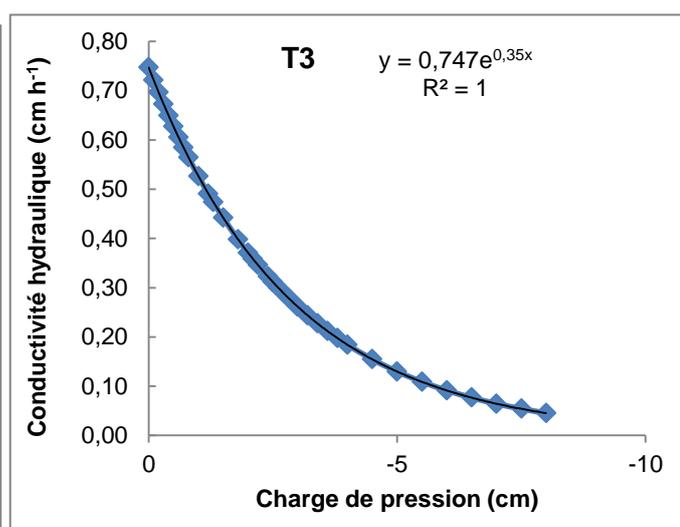
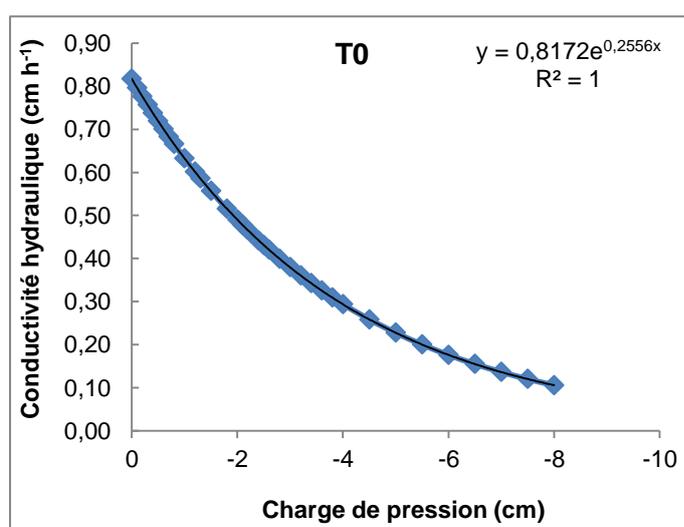
Annexe 4 : Infiltrométrie à 80 cm de profondeur

4.1. Méthode de mesure



© Mathieu Kabore

4.2. Courbes de conductivité hydraulique ajustées



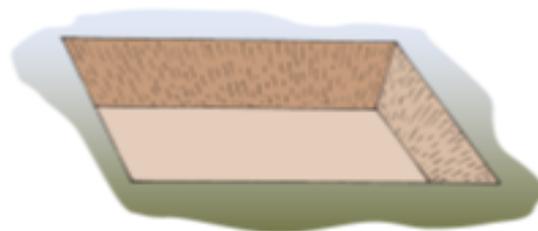
Annexe 5 : Guide de construction des bassins de collecte des eaux de ruissellement

Dessins réalisés par Lougué

Dimensionnement du bassin de collecte des eaux de ruissellement (BCER)

Le volume optimal du BCER dépend de :

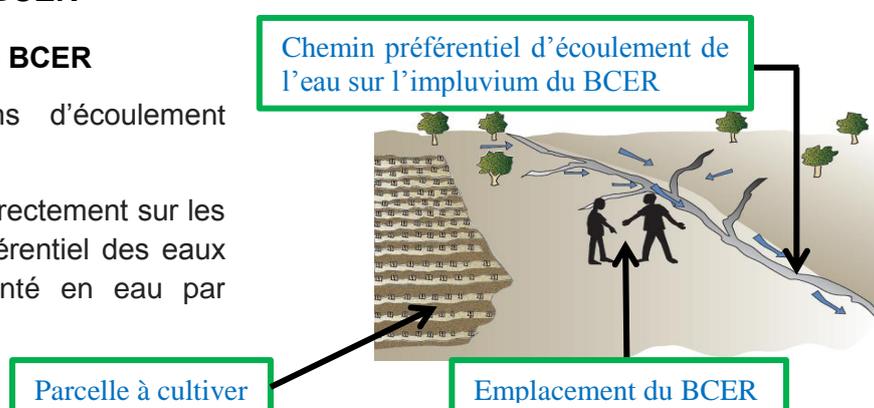
- La superficie à cultiver ;
- Les besoins en eau de la culture ;
- L'évaporation et la perméabilité du sol au niveau du BCER ;
- Les fréquences, intensités et durées des pluies ;
- Les durées et récurrences observées des poches de sécheresse dans la localité.



Étapes de la construction du BCER

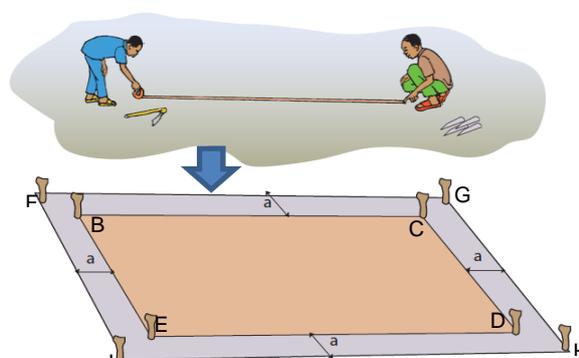
Choix du site d'implantation du BCER

- Tenir compte des chemins d'écoulement préférentiel des eaux ;
- Éviter d'implanter le bassin directement sur les chemins d'écoulement préférentiel des eaux (le bassin doit être alimenté en eau par dérivation).



Implantation du BCER

- Matérialiser sur le sol les limites de la surface du fond du bassin (**BCDE**).
- Matérialiser sur le sol les limites de la surface supérieure du bassin (**FGHI**) : l'écart entre les deux surfaces (**a**) est égal à la profondeur pour une pente de parois de 45°.



Excavation

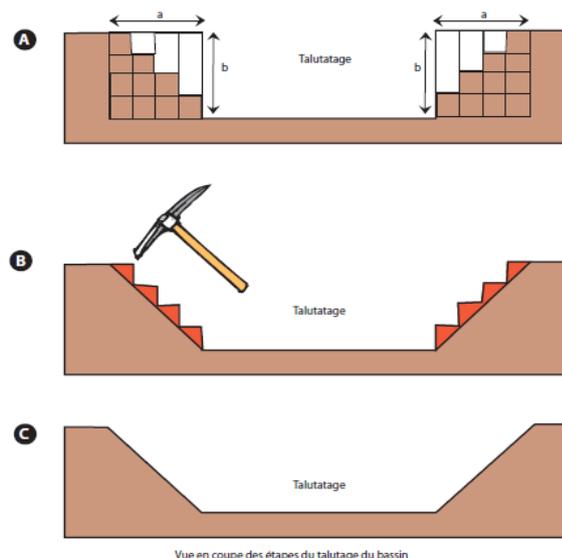
- Se munir de pelles, pioches, brouettes, barre-à-mine et houes.
- Creuser la partie centrale du bassin (**BCDE**) jusqu'à la profondeur (**b**) souhaitée.
- Déposer les déblais à 3 m des limites (**FGHI**) du bassin pour former le bourrelet de protection.



©Chaim Doto

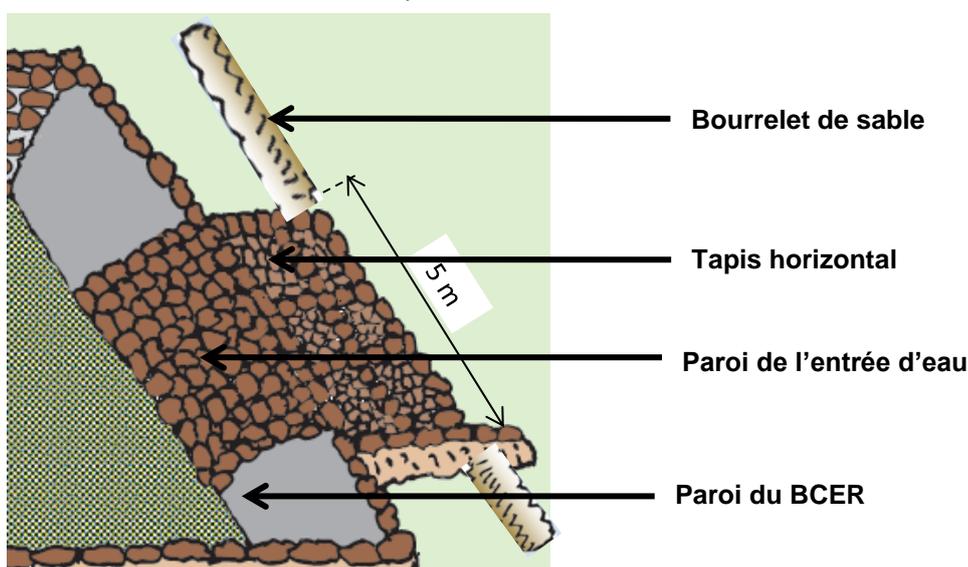
Taille des parois (ou talutage)

- Tailler les parois en escaliers pour faciliter le talutage (**schéma A**) :
 - ✓ Pour une pente de talus de 45° « **a** » devrait être égal à « **b** » (conseillé pour tout type de sol)
 - ✓ Pour une pente de talus supérieure à 45° « **a** » devrait être inférieur à « **b** » (conseillé pour les sols latéritiques)
 - ✓ Pour une pente de talus inférieure à 45° « **a** » devrait être supérieur à « **b** » (conseillé pour les sols sableux/sablo-limoneux)
- Supprimer les marches des escaliers à partir du haut (**schéma B**) pour obtenir la forme finale du talus (**schéma C**).



Aménagement de l'entrée d'eau

- Tapis horizontal de l'entrée d'eau
 - ✓ Faire une ouverture de 5 m de long dans le bourrelet de protection ;
 - ✓ Décaper sur 30 cm de profondeur l'espace entre cette ouverture et la bordure du bassin ;
 - ✓ Remplir cet espace de gravillons sur 15 cm d'épaisseur ;
 - ✓ Disposer de gros moellons (30 cm de diamètre) de sorte à avoir 6 compartiments d'environ 1,3 m de long et 0,70 m de large ;
 - ✓ Remplir méticuleusement chaque compartiment de moellons d'environ 20 cm de diamètre.
- Paroi de l'entrée d'eau
 - ✓ Décaper le pied du talus sur 15 cm de profondeur tout le long des 5 m ;
 - ✓ Disposer une ligne horizontale de gros moellons sur la bande découpée en guise de butée ;
 - ✓ Verser ensuite du gravillon dans les interstices pour protéger la paroi ;
 - ✓ Disposer successivement à partir de cette ligne de butée des lignes de moellons jusqu'à la bordure supérieure ;
 - ✓ Remplir de gravillons les interstices après chaque ligne de moellons ;
 - ✓ Compléter le remplissage des interstices par des moellons de tailles plus petites et convenables de sorte à stabiliser la paroi de l'entrée d'eau.



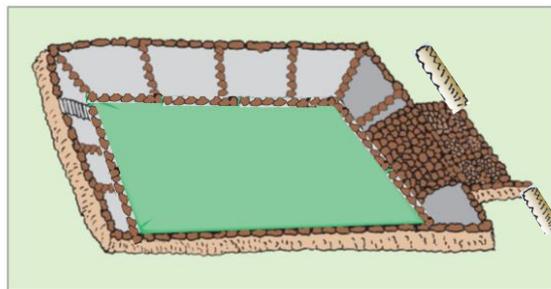
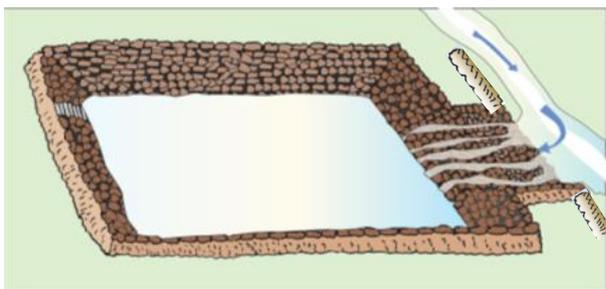
Stabilisation des parois et imperméabilisation des BCER

NB : Les matériaux sont choisis en fonction des types de sols (perméabilité, structure). La préférence est donnée aux matériaux locaux (faible coût de revient).

- Sols latéritiques (indurés)
 - ✓ Si imperméables, le bassin est prêt pour usage après excavation et talutage (éventuel)
 - ✓ Si perméables :
 - Utiliser du béton dosé à 250 et appliquer sur une épaisseur d'au moins 5 cm sur les parois
 - Tapisser le fond d'une couche de 20 cm de matériaux argileux (au moins 30% d'argile) compactés
- Sols lourds (argileux, argilo-limoneux)
 - ✓ Protéger les parois par du perré sec (moellons et gravillons) ;
 - ✓ Le fond reste en l'état ou tapissé de 20 cm de matériaux argileux.

NB : Eviter le béton sur les sols argileux gonflants

- Sols légers (sableux, sablo-limoneux, sablo-argileux)
 - ✓ Pour les parois :
 - Utiliser du perré maçonné dans les angles du bassin, le long des pieds des parois et à chaque 5 m sur les parois ;
 - Utiliser un béton légèrement armé (ciment + 1/3 sable + 2/3 gravillons + grillage de poulailler en treillis soudés) dosé à 250 et appliquer en épaisseur de 5 cm sur les parois.
 - ✓ Pour le fond
 - Utiliser du polystyrène ou une bâche (650 g/m²) ;
 - Coulisser le polystyrène ou la bâche de 10 cm sous la butée de pieds des parois ;
 - Maçonner convenablement de sorte à éviter toute infiltration d'eau.



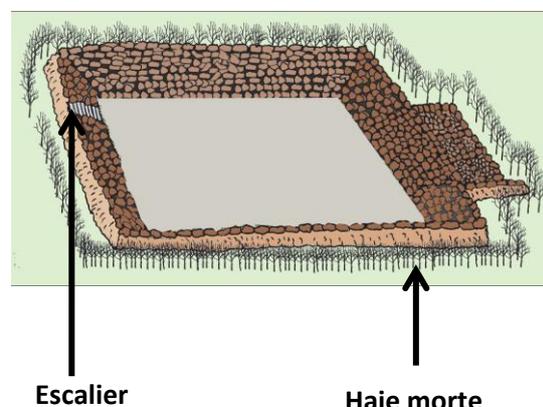
Sécurisation et entretien du BCER

- Escalier
 - ✓ Faire des marches de 20 cm de hauteur et une envergure d'au moins 1,2 m dans les parois talutées ;
 - ✓ Positionner de préférence l'escalier du côté de la parcelle exploitée

- Clôture du BCER

La clôture du BCER peut être faite sous forme :

- ✓ de grillage,
- ✓ ou de haie-morte constituée d'épineux
- ✓ Clôture du BCER
- Eléments pour entretien
 - ✓ Enlever les dépôts de sédiments piégés par les moellons (perré sec)
 - ✓ Colmater les éventuelles fissures avec du béton ;
 - ✓ Curer le fond du BCER une fois par an en saison sèche



Escalier

Haie morte

Annexe 6 : Résultats des tests d'analyse de variance

6.1. Hauteur des plantes de la campagne agricole 2013-2014

Source	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Écarts moyens	Statistique F	Probabilité
Traitements	3	5087	1696	0,52	0,673 ^{ns}
Erreur	24	78361	3265		
Total	27	83448			

6.2. Hauteur des plantes de la campagne agricole 2014-2015

Source	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Écarts moyens	Statistique F	Probabilité
Traitements	3	438	146	0,03	0,992 ^{ns}
Erreur	24	110013	4583		
Total	27	110451			

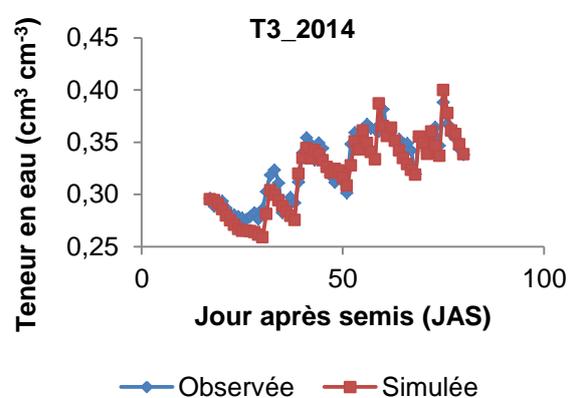
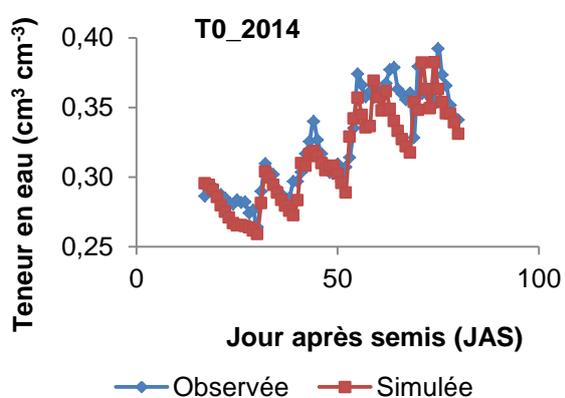
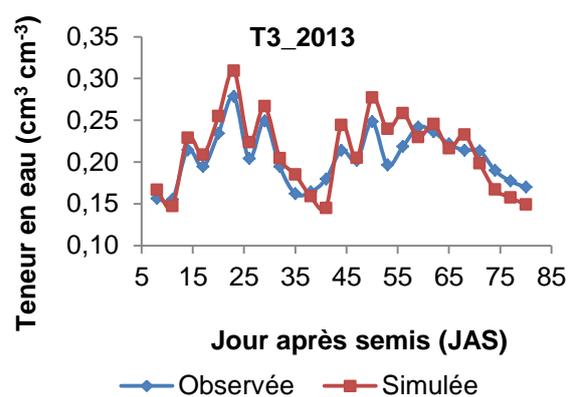
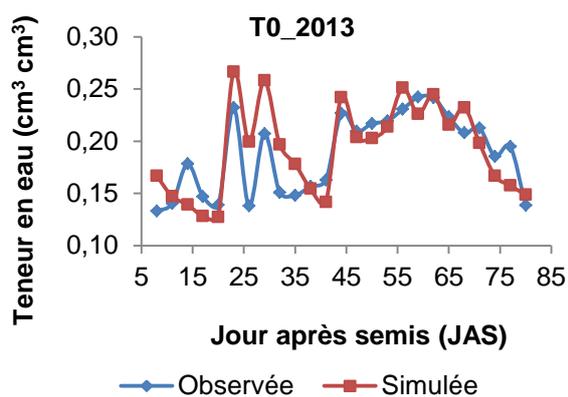
6.3. Rendement grain de la campagne agricole 2013-2014

Source	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Écarts moyens	Statistique F	Probabilité
Traitements	3	42741	14247	0,92	0,444 ^{ns}
Erreur	28	433901	15496		
Total	31	476641			

6.4. Rendement grain de la campagne agricole 2014-2015

Source	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Écarts moyens	Statistique F	Probabilité
Traitements	3	24647	8216	2,12	0,151 ^{ns}
Erreur	12	46579	3882		
Total	15	71226			

ns = non significatif

Annexe 7 : Evolution comparée des teneurs en eau observées et simulées

Annexe 8 : Liste des productions scientifiques et résumé des articles

Articles

1. **Doto, C.V.**, Ahamide, B., Agbossou, K.E., 2013. Evaluation de la consommation en eau et du rendement de la culture de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sur un sol ferrallitique au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 74 : 36-47.
http://www.slire.net/download/2177/article_5_complet_brab_n_74_d_cembre_2013_doto_et_al.pdf
2. **Doto, C.V.**, Yacouba, H., Niang, D., Lahmar, R., Agbossou, K. E., 2015. Mitigation Effect of Dry Spells in Sahelian Rainfed Agriculture: Case Study of Supplemental Irrigation in Burkina Faso. *African Journal of Agricultural Research*, 10 (16): 1863-1873.
<http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2015.9639>
3. **Doto, C.V.**, Yacouba, H., Niang, D., Lahmar, R., 2015. An Alternative Strategy for Mitigating the Effect of Rainfall Variability in Burkina Sahel. *Journal of Water resource and Protection*, 7 (16): 1318-1330. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.716107>

Acte des Colloques ou Conférences

1. **Doto, C.V.**, Yacouba, H., Niang, D., Agbossou, K.E., 2013. Analyse du fonctionnement hydrique des sols sous irrigation de complément et son incidence sur la physiologie d'une variété de maïs dans le Sahel Burkinabè. 38^{ème} Journées du GFHN sur: Les Matériaux Argileux, des sols aux Géomatériaux, Poitiers, France.
http://gfh2013.conference.univ-poitiers.fr/recueil_resume_format_02.pdf
2. **Doto, C.V.**, Yacouba, H., Niang, D. 2013. Irrigation de complément à partir de petits bassins individuels : quelle contribution pour assurer la sécurité alimentaire en zone de pluviométrie variable ? 7^{ème} édition des Journées Scientifiques de 2iE, Ouagadougou-Burkina Faso.
3. **Doto, C.V.**, Agbossou, K.E., Ahamide, B., 2013. Etude de la consommation en eau et du rendement d'une culture de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sur un sol ferrallitique tropical au Sud-Bénin. Acte des conférences de la 7^{ème} édition des Journées Scientifiques de 2iE, 316-319, Ouagadougou-Burkina Faso.
http://www.2ie-edu.org/assets/Collection_acte_conference_journees_scientifiques_2iE_2013.pdf

Contribution

Niang, D. Yacouba, H., **Doto, C.V.**, Karambiri, H., Lahmar, R., 2015. Land Degradation Impact on Water Transfer of Soil-Plant-Atmosphere Continuum in the Burkina Sahel. *Larhyss Journal*, 24: 109-127. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/333/310>

Evaluation de la consommation en eau et du rendement de la culture de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) sur un sol ferrallitique au Sud-Bénin

C. V. Doto², B. Ahamide³ et K. E. Agbossou³

Résumé

Le soja (*Glycine max (L.) Merr.*) est une plante moins exigeante en eau mais sensible au stress hydrique. L'objectif de l'étude est d'estimer la consommation en eau du soja. Le dispositif expérimental a été un bloc aléatoire complet à deux facteurs : irrigation (facteur principal) et inoculation (facteur secondaire). La méthodologie adoptée a porté sur des mesures humidimétriques et tensiométriques pour l'évaluation des consommations en eau, et sur la croissance en hauteur et la détermination des paramètres de production pour l'étude du comportement physiologique du soja. La teneur en protéines des graines de soja a été déterminée avec la méthode de KJELDAHL. Les résultats relatifs aux mesures humidimétriques et tensiométriques ont révélé des périodes de stress hydrique au cours des stades végétatifs et de floraison du soja dans les parcelles non irriguées. Un drainage généralisé s'observait dans les parcelles irriguées durant toute la période d'essai pendant que des phénomènes de remontées capillaires étaient notés dans les parcelles non irriguées. Les apports d'eau proposés en cas d'un déficit pluviométrique de 3 à 5 j étaient équivalents à la Réserve Facilement Utilisable (RFU) du sol (15 mm). La teneur moyenne en protéines était égale à 45% de la matière sèche des grains déshuilés, avec un rendement en grains de 1,4 t/ha dans les parcelles irriguées contre un rendement en grains de 0,6 t/ha pour une teneur moyenne en protéines de 40,4% dans les parcelles non irriguées. La hauteur moyenne significativement ($p < 0,05$) atteinte sur ces deux groupes de parcelle était respectivement égale à 70 cm et à 32 cm. L'inoculation du soja a un effet significatif ($p < 0,05$) sur le rendement en grains mais non significatif ($p > 0,05$) sur la croissance des plantes.

Mots clés

Soja, transfert d'eau, bilan hydrique, rendement, sol ferrallitique, Bénin.

Evaluation of water consumption and yield of soya crop (*Glycine max (L.) Merr.*) on acrisol in the Southern-Benin

Abstract

Soya is a crop which doesn't need much water but it is too vulnerable to water stress. This research, aims to estimate soya water consumption. The experimental design was a randomized complete block with two factors: irrigation (main factor) and inoculation (secondary factor). The methodology focused on the measures of the water content and the pressure head for the evaluation of soya water consumption, and on the height growth and determination of production parameters for the study of the physiological behavior of soya. The soya protein content was determined using the KJELDAHL method. Results for water content and pressure head measurements revealed periods of water stress during the vegetative and flowering stages of soya in non-irrigated plots. Widespread drainage was observed in irrigated plots throughout the test period while capillarity phenomena were noted in the non-irrigated plots. The proposed water supplies in the event of a rainfall deficit of 3 to 5 days were equivalent to the Easily Usable Reserve (RFU) of the soil (15 mm). The average protein content was 45 % of the dry matter oiled grains, with a grain yield of 1.4 t/ha in irrigated plots against a grain yield of 0.6 t/ha at an average protein content of 40.4 % in non- irrigated plots . The average height significantly ($p < 0.05$) achieved in these two groups plot was respectively equal to 70 cm and 32 cm. Inoculation of soya has a significant ($p < 0.05$) effect on the grain yield but not significant ($p > 0.05$) on plant growth.

Keywords

Soya, water flow, water balance, acrisol, Benin.

² Ir. C. V. DOTO, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Tél. : (+226) 71 91 29 91, e- mail : vichaim@yahoo.fr, République du Burkina Faso

³ Dr. Ir. Bernard AHAMIDE, LHMES/FSA/UAC, 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01, Tél. : (+229) 96 80 35 19, e- mail : bahamide@gmail.com, République du Bénin

³ Pr. Dr Ir. K. Euloge Agbossou, LHMES/FSA/UAC, 01 BP 526 Recette Principale, Cotonou 01, Tél. : (+229) 97 84 37 53/95 71 30 11, e-mail : euloge.agbossou@gmail.com, agbossou.euloge@yahoo.fr, République du Bénin

Vol.10(16), pp. 1863-1873 , April 2015
DOI: <http://www.dx.doi.org/10.5897/AJAR2015.9639>
Article Number - 4F9AF2C52488
ISSN: 1991-637X



Full Length Research Paper

Mitigation effect of dry spells in Sahelian rainfed agriculture: Case study of supplemental irrigation in Burkina Faso

Vivien Chaim Doto^{1*} Hamma Yacouba¹ Dial Niang¹
Rabah Lahmar^{1,2} Euloge Kossi Agbossou³

¹International Institute for Water and Environmental Engineering (Fondation-2IE), 01 P.O. Box 594, Ouagadougou, Burkina Faso

²CIRAD, Unité de Recherche Agroécologie et Intensification Durable des cultures Annuelles - Avenue Agropolis 34398 - Montpellier cedex 5, France

³Laboratoire d'hydraulique et de Maîtrise de l'Eau, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey Calavi, 01BP 526 FSA/UAC, Cotonou, Bénin

*Corresponding author: vichaim@yahoo.fr

Received: 19 February 2015 Accepted: 07 April 2015 Published: 16 April 2015

Copyright © 2015 Author(s) retain the copyright of this article.

This article is published under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract

This study aims to isolate the supplemental irrigation (SI) scenario from permeable rainwater harvesting basins (RWHBs) best suitable to mitigate the long dry spells (DSs) in Burkina Faso Sahel (BS). The water flow in the soil was studied on corn crop during 2013 and 2014 depending on the available water in the monitored RWHB. The experimental design was a block Fisher with four treatments (one under rainfed regime and three under supplemental irrigation). Measurements of the soil water content revealed periods of corn water sufficiency in plots under SI. Average corn yields were respectively 4500 and 4600 kg ha⁻¹ for 2013 and 2014 on plots under SI against 3700 and 3800 kg ha⁻¹ for those in rainfed regime. The average contribution of the SI in increasing corn yield was respectively 24 and 26% in 2013 and 2014 for three supplemental irrigations (SIs), against 19 and 17% for two SIs. With these SIs, the water balance in the RWHB gave respectively at the end of 2013 and 2014, an available water of 60 and 81 mm. The suitable strategy of the SI to mitigate DSs effect in BS was applying two SIs with a dose at least 40 mm around the mid-season.

Keywords

Supplemental irrigation, rainwater harvesting, dry spell mitigation, sustainable development, corn, Sahel.

An Alternative Strategy for Mitigating the Effect of Rainfall Variability in Burkina Faso Sahel

Vivien Chaim Doto¹, Hamma Yacouba¹, Dial Niang¹, Rabah Lahmar^{2,3}

¹Laboratory of Hydrology and Water Resources, International Institute for Water and Environmental Engineering (Fondation-2IE), 01 BP 594, Ouagadougou, Burkina Faso

²Unité de Recherche Agroécologie et Intensification Durable des cultures Annuelles, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier cedex 5, France

³Département de Production Végétale, Institut National Agronomique de Tunisie, Tunis-Mahrajène, Tunisie

Email: vichaim@yahoo.fr

Received 12 September 2015; accepted 20 November 2015; published 23 November 2015

Copyright © 2015 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Abstract

This study carried out in the Burkina Faso Sahel aimed at studying the contribution of the practice of supplemental irrigation (SI) via excavated rainwater harvesting basin (RWHB) for mitigating the effect of rainfall variability on agricultural production and impact of these RWHB on the dynamics of the water table. This study was conducted during two growing seasons (2013 and 2014) and used a test plot cultivated in corn and fitted out with measuring instruments to analyze water transfer in the soil-plant-atmosphere system on the one hand and the atmosphere-RWHB-water table system on the other hand. Four treatments: one under rainfall regime (T0) and three under SI (T1, T2, T3) were used in the experimental design to assess the contribution of the RWHB in improving corn yield. These SI were applied during the mid-season of corn (flowering, pollination, grain filling). Water flow beneath a partially waterproofed RWHB was assessed using HYDRUS-2D/3D program. Results showed that water stored in the RWHB allowed applying up to three SI, and increased corn yield up to 24 and 26% respectively in 2013 and 2014. However, SI targeting flowering and grain filling were the best scenario to mitigate effect of dry spell in rainfed agriculture. Water flow under RWHB during the simulation period showed that dynamic of the saturated front depends on the magnitude of the water depth in the RWHB and the hydrodynamic characteristics of the underlying layers. Deep drainage was observed around 25th day after sowing (DAS) in 2013 and 45th DAS in 2014 according to water profile. This caused the decrease of the infiltration rate in the RWHB that was associated with a significant rise of 4% of the water table level ten days later in 2014. Recharge rate was estimated at 0.5 mm d⁻¹ during the mid-season and the late season of corn.

Keywords

Rainwater harvesting basin, Dry spells mitigation, Water table recharge, HYDRUS, Sahel

How to cite this paper: Doto, C.V., Yacouba, H., Niang, D. and Lahmar, R. (2015) An Alternative Strategy for Mitigating the Effect of Rainfall Variability in Burkina Faso Sahel. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 1318-1330. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.716107>



Land Degradation Impact On Water Transfer Of Soil-Plant-Atmosphere Continuum In The Burkinabe Sahel

NIANG D.¹, YACOUBA H.¹, DOTO C. V.^{1,*} KARAMBIRI H.¹, LAHMAR R.²

¹ International Institute for Water and Environmental Engineering (Fondation-21E)-Laboratory of Hydraulic, 01 BP 594, Ouagadougou, Burkina Faso.

² Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) UPR Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles. Avenue Agropolis 34398 - Montpellier cedex 5, France

*Corresponding author: vichaim@yahoo.fr

ABSTRACT

This research conducted in the Tougou watershed located in North of Burkina Faso aims at assessing the impact of soil degradation on the water transfer in the soil-plant-atmosphere continuum. Field measurements were performed through an experimental design made of plots measuring 1 m² each and established on three sites of the watershed: three plots on an erosion crust (PZN), three plots on a desiccation crust supported herbaceous (PZD) and three plots on an area cultivated in sorghum (PZC). Each site was equipped with tensiometric and neutron tubes to measure pressure head and water content of the soil. Results showed that PZN was characterized by a low infiltration capacity enhancing runoff. The water stored during the rain periods is low and remains localized within the first 30 or even 40 cm top of soil, which promoted a quick evaporative recovery in days following the rainy event. PZD and PZC were characterized by a good hydraulic conductivity and a high infiltration speed. The infiltrated water was important and the drainage beyond the depth of 70 cm was observed during important rain events. The real daily average evapotranspiration varied between 3 and 4 mm on the all sites.

Keywords: Soil crust, sandy deposits, water balance, soil hydrodynamic properties, Sahel

RESUME

Cette recherche menée dans le bassin versant de Tougou situé au Nord du Burkina Faso vise à évaluer l'impact de la dégradation des sols sur le transfert de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. Les mesures de terrain ont été réalisées grâce à un modèle expérimental en parcelles de 1 m² chacune et effectuées sur trois sites du bassin versant: trois parcelles sur une croûte d'érosion (PZN), trois parcelles sur une croûte de dessiccation supportant les herbacés (PZD) et trois parcelles sur un espace cultivé en sorgho (PZC). Chaque site a été équipé de cannes tensiométriques et de tubes neutroniques pour mesurer respectivement la charge de pression et la teneur en eau du sol. Les résultats ont montré que PZN a été caractérisé par une faible capacité d'infiltration favorisant ainsi le ruissellement. L'eau stockée pendant les périodes de pluie est faible et reste localisée dans les premiers 30 ou même 40 cm supérieurs du sol ; ce qui a favorisé une reprise évaporatoire rapide durant les jours suivant l'événement pluvieux. PZD et PZC ont été caractérisés par une bonne conductivité hydraulique et une grande vitesse d'infiltration. L'eau infiltrée était importante et le drainage au-delà de la profondeur de 70 cm a été observé au cours des événements de pluie importantes. L'évapotranspiration réelle moyenne journalière a varié entre 3 et 4 mm sur tous les sites.

Mot clés : Croûte de sol, dépôt sableux, bilan d'eau, propriétés hydrodynamiques des sols, Sahel