



EVALUATION DE LA DISPONIBILITE EN EAU SOUTERRAINE A BUT AGRICOLE : CAS DE BAMA AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER
SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE (GCH)

Présenté et soutenu publiquement le 03 Juillet 2020 par

Wend-Yida Aurélie Létissia TAPSOBA (20140115)

Directeur de mémoire : Dr. Mahamadou KOITA, Maître de conférences, enseignant chercheur en hydrogéologie, 2iE.

Co-directrice de mémoire : Dr. Aissata Delphine NATI/BAMA ; chargée de recherche en Hydraulique Agricole, INERA.

Structure d'accueil du stage : Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole (INERA)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr. Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Dr. Angelbert Chabi BIAOU
M. Bassirou BOUBE

Promotion [2019/2020]

DEDICACES



*Je dédie ce document à ma Mère et à mon défunt Père qui m'ont toujours
soutenu.*

REMERCIEMENTS

Je voudrais en ces lignes, traduire toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui de près ou de loin ont participé au bon déroulement de ces travaux.

Que toute la famille enseignante et administrative de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour l'effort fourni durant toute ma formation et pour nous avoir donné une formation de bonne qualité.

Je remercie le Directeur du Centre de Recherche Environnemental, Agricole et de Formation (CREAF) de Kamboinsé Dr KORODJOURA de m'avoir accueillie dans la structure pour ces moments d'apprentissage et de partage.

Je remercie particulièrement :

- Pr. Mahamadou KOITA, mon Directeur de mémoire qui n'a ménagé aucun effort pour m'accompagner ;
- Dr BAMA/NATI, mon encadreur pour sa disponibilité et son suivi tout au long de ce stage et à travers elle toute l'équipe du TAAT/WEC au Burkina ;
- Dr NIANG, pour sa recommandation pour l'obtention de ce stage ;
- M. GARBA pour sa franche collaboration ;
- L'ensemble des producteurs de la plaine de Bama qui ont collaboré lors de la phase terrain ;
- Mes collègues stagiaires BARKE GUIDA Habiba, BAZONGO Jérôme, SANKARA Oussen et KABORE Eric de l'INERA pour leur aide et accompagnement très précieux.

Enfin mes remerciements se tournent vers mes frères et sœurs de 2iE pour les critiques et les observations :

Que Dieu vous bénisse !

RESUME

Les baisses de rendement agricoles auxquelles fait face l'agriculture Burkinabé ont suscité l'engouement des chercheurs sur les problématiques liées aux pratiques agricoles et ressources en eau utilisées. La plaine alluviale du Kou, plus précisément le périmètre de Bama dans la région des Hauts Bassins fait face à une pénurie d'eau pendant la saison sèche. Pour pallier ce problème, le recours à l'eau souterraine a été pensé et la possibilité de son utilisation étudiée.

L'objectif de cette étude est d'améliorer la connaissance sur la disponibilité de l'eau souterraine pour la culture de contre-saison. L'approche méthodologique adoptée a consisté tout d'abord à faire une recherche bibliographique, ensuite une récolte des données et enfin un traitement de ces données qui nous a permis de faire ressortir les pratiques actuelles d'utilisation en eau pour la culture de contre saison, les besoins en eau des cultures en contre-saison, la quantité d'eau mobilisable pendant la contre-saison et la faisabilité sur l'utilisation de tubewell.

Les essais d'infiltration révèlent que la conductivité hydraulique à saturation est de **34.98 mm/h** pour un sol de type sablo-limoneux avec une réserve utile de **125 mm/m**. Il a été constaté qu'une utilisation libre de l'eau souterraine par les producteurs entraîne un gaspillage d'eau d'environ **7,3 %** du volume pompé tandis que l'utilisation de certaines méthodes comme le Alternating Witting and Drying peut faire tendre ce chiffre à la baisse. La recharge se fait par infiltration et est donc influencé par les hauteurs de pluie. La valeur de la recharge de **170 mm/an** démontre la capacité de la nappe à satisfaire les besoins agricoles du périmètre irrigué de Bama. L'utilisation combinée de la technologie du tubewell et de la méthode du AWD pour l'irrigation de contre-saison permet d'atteindre des rendements pouvant aller jusqu'à **6 t/ha/an**.

Mots Clés :

- 1 – Contre-saison**
- 2 – Eau Souterraine**
- 3 – Périmètre irrigué**
- 4 – Recharge**
- 5 – Tubewell**

ABSTRACT

The decreases in agricultural yields faced by Burkina agriculture have aroused the enthusiasm of researchers on problems related to practices and the water resources used. The alluvial plain of Kou, more precisely the irrigated perimeter of Bama in the region of high basins faces a water shortage during the dry season. To overcome this problem, the use of groundwater has been considered and the possibility of its use studied.

The objective of study is to improve knowledge on the availability of groundwater for off-season cultivation.

The methodological approach adopted consisted first to carry out a bibliographic research, then a collection of the data and finally a processing of this data which allowed us to bring out the current practices of water use for the off season cultivation, the needs in crop water in the off-season, the amount of water that can be mobilized during the off-season and the feasibility of using the tubewell.

The infiltration tests reveal that hydraulic conductivity at saturation is **34.98 mm/h** for sandy loam soil with a useful reserve of **125 mm/m**.

It has been found that the free use of this water by the producers leads to a waste of **7.3 %** of the pumped demand, whereas the use of certain methods such as the AWD can make this figure tend to drop.

The recharge of water table is done by infiltration and therefore influenced by rain depths. It generally starts in April to reach its maximum between May and October.

The value of recharge of **170mm/year** show the capacity of resource to satisfy the agriculture needs of irrigated perimeter of Bama. The combined use of tubewell technology and AWD method for off-season irrigation achieves efficiencies of up **6 t/ha/year**.

Key words :

-
- 1 – Off-season**
 - 2 – Ground Water**
 - 3 – Irrigated perimeter**
 - 4 - Recharg**
 - 5–Tubewell**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AWD	: Alternate Wetting and Drying
ET0	: Evapotranspiration de Référence
ETR	: Evapotranspiration réelle
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
INERA	: Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole
ONEA	: Office National de l'Eau et de l'Assainissement
GFG	: Aquifère des Grès Fins Glauconieux
GGQ	: Aquifère des Grès à yeux de Quarts ou Grès à Granules de Quartz (GGQ)
SAC	: Aquifère silistones Argilites et Carbonates
GFR	: Grès Fins Roses
SOGREAH	: Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
DGRE	: Direction Générale des Ressources en Eau
RFU	: Réserve Facilement Utilisable
RU	: Réserve Utile
SPAW	: Soil Plant Air and Water

SOMMAIRE

DEDICACES	<i>i</i>
REMERCIEMENTS	<i>ii</i>
RESUME	<i>iii</i>
ABSTRACT	<i>iv</i>
LISTE DES ABREVIATIONS	<i>v</i>
SOMMAIRE	<i>vi</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>viii</i>
LISTE DES FIGURES	<i>ix</i>
LISTE DES PHOTOS	<i>x</i>
LISTE DES EQUATIONS	<i>xi</i>
I. INTRODUCTION	<i>1</i>
I.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	<i>1</i>
I.2 OBJECTIFS DU TRAVAIL	<i>2</i>
I.3 ORGANISATION DU RAPPORT	<i>2</i>
II. GENERALITES	<i>3</i>
II.1 NOTION DE PLAINE ALLUVIALE, DE RIZICULTURE DE CONTRE-SAISON ET DE TUBEWELL	<i>3</i>
II.1.1 Les plaines alluviales et leur apport dans la production de contre saison	<i>3</i>
II.1.2 La riziculture de contre saison et recours à l'eau souterraine sur les plaines irriguées.	<i>3</i>
II.1.3 La technologie du tubewell	<i>4</i>
II.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	<i>4</i>
II.2.1 Localisation de la zone d'étude.....	<i>4</i>
II.2.2 Contexte climatique	<i>5</i>
II.2.3 Contexte hydrologique.....	<i>5</i>
II.2.4 Les sols et la végétation	<i>6</i>
II.2.5 Contexte géologique	<i>7</i>
II.2.6 Contexte hydrogéologique	<i>8</i>
III. MATERIELS ET METHODES	<i>10</i>
III.1 MATERIELS UTILISES	<i>10</i>

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

III.1.1	Données utilisées	10
III.1.2	Matériel physique	10
III.1.3	Matériel végétal	11
III.1.4	Outils informatiques.....	11
III.2	METHODOLOGIE.....	11
III.2.1	Diagnostic des pratiques actuelles d'utilisation de la ressource en eau des cultures.....	11
III.2.2	Evaluation des besoins en eau des cultures en contre saison	13
III.2.3	Evaluation de la quantité d'eau mobilisable pendant la contre saison	17
III.2.4	Technologie du tubewell.....	21
IV.	RESULTATS ET DISCUSSION	26
IV.1	DIAGNOSTIC DES PRATIQUES ACTUELLES D'UTILISATION DE LA RESSOURCE EN EAU POUR LES CULTURES DE CONTRE SAISON	26
IV.2	EVALUATION DES BESOINS EN EAU DES CULTURES EN CONTRE SAISON .	27
IV.2.1	Caractérisation du sol : mesure d'infiltration.....	27
IV.2.2	L'évapotranspiration de référence ET ₀	28
IV.2.3	L'évapotranspiration maximale	29
IV.2.4	La dose brute (Db)	30
IV.3	EVALUATION DE LA QUANTITE D'EAU SOUTERRAINE MOBILISABLE	32
IV.3.1	Caractérisation de la fluctuation piézométrique.....	32
IV.3.2	Estimation de la recharge par la méthode du bilan de thorthwaite.....	35
IV.3.3	Discussion sur la productivité de la nappe.....	36
IV.4	TECHNOLOGIE DU TUBEWELL	37
IV.4.1	Choix du site	37
IV.4.2	Suivi du dispositif	41
CONCLUSION- PERSPECTIVES		45
Recommandations.....		46
BIBLIOGRAPHIE		47
ANNEXES		I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Volume d'eau prélevé estimé in situ.....	27
Tableau 2 : Nature du sol	27
Tableau 3 : Caractéristiques du sol	28
Tableau 4 : Valeurs des ETM en fonction du Mois	29
Tableau 5 : Valeurs de l'efficience de distribution	30
Tableau 6 : Valeurs des efficacités d'application	30
Tableau 7 : Valeurs des besoins en eau	31
Tableau 8 : Comparaison entre le volume prélevé et les besoins en eau des plantes.....	31
Tableau 9: Variation de stock d'eau par la méthode de la fluctuation piézométrique	35
Tableau 10: Valeurs des paramètres de Thornthwaite	36
Tableau 11 : Coordonnées des tubewell.....	37
Tableau 12 : Débits	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie de la localisation de la zone d'étude	4
Figure 2 : Variation de la pluviométrie annuelle de 2004 à 2018	5
Figure 3 : Cartographie du Bassin versant du Kou	6
Figure 4 : Cartographie de la géologie du Kou	8
Figure 5 : Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite (Dakouré, 2003).....	19
Figure 6 : Cartographie des grands puits.....	26
Figure 7 : Courbes comparatives de ET0 estimé par différentes formules	29
Figure 8 : Variation temporelle du piézomètre PB01	32
Figure 9 : Variation temporaire du piézomètre PB02	33
Figure 10 : Variation temporelle du piézomètre PB04	33
Figure 11 : Variation temporelle du piézomètre PS01	34
Figure 12 : Tubewell 1	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : Tubewell 2	40
Figure 14 : Fluctuation de la nappe piézomètre 1	42
Figure 15 : Fluctuation de la nappe piézomètre 2	42
Figure 16 : Fluctuation de la nappe piézomètre 3	43
Figure 17 : Fluctuation de la nappe piézomètre 4	43

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : GPS Garmin	10
Photo 2 : Tube en fonte	10
Photo 3 : Double anneau de Muntz	11
Photo 4 : Séance d'enquête (a)	12
Photo 5 : Séance d'enquête (b).....	12
Photo 6 : Prise de coordonnées	12
Photo 7 : Grand puits.....	12
Photo 8 : Double anneau de Muntz	14
Photo 9 : Réalisation du tubewell.....	24
Photo 10 : Réalisation du tubewell.....	24
Photo 11 : Installation des tuyaux d'irrigation	24
Photo 12 : Vannes d'irrigation	24

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Calcul du débit	12
Équation 2 : Calcul du volume d'eau prélevée	13
Équation 3 : La formule de la réserve utile	14
Équation 3 : La formule de Blaney et Criddle	15
Équation 4 : La formule de Thornthwaite	15
Équation 5 : La formule de Penman modifiée.....	16
Équation 6 : Evapotranspiration maximale ETM.....	16
Équation 7 : Dose pratique	16
Équation 8 : Dose brute	17
Équation 9 : Niveau piézométrique	18
Équation 10 : recharge.....	18
Équation 11 : Bilan de Thornthwaite	19
Équation 12 : Formule de la capacité de stockage en eau	20
Équation 13 : Formule de l'évapotranspiration potentielle	20
Équation 14 : Formule de lame d'eau ruisselée	20
Équation 15 : Formule de la hauteur d'eau infiltrée.....	21

I. INTRODUCTION

I.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Le continent africain jouit d'un énorme potentiel agricole, pourtant près de 30% de sa population souffre d'insuffisance alimentaire (*Organization, 2018*). Le Burkina Faso, pays sahélien situé en Afrique de l'Ouest n'est pas en marge de ce fléau. Son secteur agricole qui occupe 86 % de sa population (*Diallo, Nacro, & N'diaye, 2017*) connaît une baisse considérable de ses rendements ces dernières années (*Sawadogo-Comparore & al., 2020*). Plusieurs facteurs expliquent cette faiblesse notamment la mauvaise exploitation des eaux, des sols, la faiblesse de la pluviométrie et aussi, l'accès limité aux petits exploitants à des techniques de gestions de l'eau plus adéquates (*Wellens & al., 2009*). La production céréalière de la campagne agricole 2017/2018 principalement basée sur l'agriculture pluviale a connu une baisse de 11.03 % par rapport à l'année précédente (*CommodAfrica, 2018*). Pour suppléer ces faibles rendements, l'Etat met l'accent sur les cultures de contre saison à travers l'aménagement agricole. Cependant ces nombreuses zones aménagées font face à la rareté de la ressource en eau et la mauvaise gestion de celle-ci. Les zones aménagées pour la riziculture de contre saison utilisent diverses sources d'eau telles que l'eau de surface, celle des sources et quelques fois l'eau souterraine (*Nazoumou & al., 2016*). Les débits fournis par les cours d'eau qui alimentent ces plaines ont drastiquement diminués ces dernières années à cause des différents usages.

Face à cette situation le gouvernement burkinabé a pris depuis quelques années de fortes mesures pour accroître la productivité de l'eau pendant la contre saison. Cela passe par le développement de plusieurs nouvelles méthodes, les actions pour une meilleure gestion de l'eau et aussi le recours alternatif à d'autres sources d'eau telles que l'eau souterraine au niveau de ces plaines.

Le périmètre irrigué de la vallée du Kou comme bien d'autres a connu une baisse considérable de sa productivité annuelle. Sa production initialement estimée à 7t/ha est passée à 4t/ha par an (*MCB-BF, AD9, 2017*). En effet, les 2/3 du périmètre soit 840 ha de parcelles de riz restent inexploités en saison sèche à cause du manque d'eau. C'est dans l'optique d'apporter des solutions face à ce problème que l'INERA a entrepris depuis 2018, en collaboration avec ses partenaires des actions pour accroître la productivité agricole à travers la vulgarisation des technologies éprouvées en matière de gestion d'eau. C'est dans cette même lancée que la présente étude a été initiée afin d'atténuer les effets de la rareté de l'eau sur la riziculture au niveau de la superficie considérée qui est de 840 ha.

I.2 OBJECTIFS DU TRAVAIL

Cette étude avait pour but d'améliorer la connaissance sur la disponibilité de l'eau souterraine pour la culture de contre saison. Plus spécifiquement :

- Diagnostiquer les pratiques actuelles d'utilisation de la ressource en eau pour les cultures de contre saison ;
- Evaluer les besoins en eau des cultures en contre saison ;
- Evaluer la quantité d'eau de la nappe mobilisable pendant la contre saison ;
- Mettre en place la technologie du tubewell.

Les résultats attendus aux termes de cette étude sont les suivants :

- Le volume total d'eau agricole prélevé par an ;
- Le volume total nécessaire pour satisfaire les besoins agricoles ;
- Le volume total d'eau souterraine mobilisable ;
- La faisabilité sur l'utilisation du tubewell.

I.3 ORGANISATION DU RAPPORT

Ce document sera structuré en quatre grandes parties comme suit :

- La première sera consacrée à l'état des lieux sur les connaissances en matière de plaine alluviale, ressource en eau souterraine de ces plaines, la technologie utilisée en termes de mobilisation de celle-ci.
- La seconde partie abordera les matériels et les méthodes mis en œuvre pour le traitement du sujet.
- La troisième partie portera sur les résultats et les discussions.
- La dernière partie présentera la conclusion et les recommandations.

II. GENERALITES

II.1 NOTION DE PLAINE ALLUVIALE, DE RIZICULTURE DE CONTRE-SAISON ET DE TUBEWELL

II.1.1 Les plaines alluviales et leur apport dans la production de contre saison

Une plaine alluviale est une surface topographique à faible dénivelée, située en fond de vallée constituée d'alluvions (galets, graviers, sables, argiles, limons...) et assimilable à la zone inondable d'un cours d'eau (*Dao, 2015*). Les principales unités hydro géomorphologiques d'une plaine alluviale sont le lit mineur qui est l'espace occupé par l'écoulement des crues courantes et le lit majeur qui est l'espace occupé par l'écoulement des grandes crues. La plaine alluviale est donc modelée par le passage répété de crues de différentes intensités.

Au Burkina Faso les plaines alluviales sont d'une grande importance car elles servent généralement à la production de contre saison. C'est le cas de la plaine alluviale du Kou où se trouve le périmètre irrigué de Bama d'une superficie de 1260 ha sur lequel est pratiquée l'irrigation du riz.

II.1.2 La riziculture de contre saison et recours à l'eau souterraine sur les plaines irriguées.

La riziculture est la pratique de la culture du riz. Elle est généralement pratiquée sur les plaines alluviales et les bas-fonds. La riziculture de contre saison est une alternative à la promotion des productions agricoles. Plusieurs travaux dans différents pays ont déjà démontré que l'eau souterraine peut être un recours à la riziculture de contre-saison. Dans certains pays comme le Niger, l'agriculture a connu un fort développement au cours de ces 10 dernières années en mettant en exergue les cultures de contre-saison (*Tangara, & al., 2017*). Cela est possible grâce au recours à l'eau souterraine. Au Niger, il a été démontré que près de 50 000 à 160 000 ha pourraient être mis en valeur en irrigation de contre saison grâce aux pompes des nappes phréatiques (*Nazoumou et al., 2016*). Quant au Burkina Faso il a été démontré que la culture de contre saison constitue un atout dans la lutte contre les crises alimentaires (*Dao, 2016*) et des études sur la plaine de Karfiléguia ont prouvé que l'eau souterraine peut être une alternative pour la riziculture de contre saison (*Dao, 2015*). Les techniques généralement utilisées sont les puits à grand diamètres mais une nouvelle technique a été développée ces dernières années dans certains pays en Afrique et ailleurs dans le monde. Il s'agit du tubewell.

II.1.3 La technologie du tubewell

Le tubewell ou encore puits tabulaire est un puits à petit diamètre généralement entre 60 et 100 mm creusé afin d'exploiter les eaux d'une nappe phréatique. Il peut être creusé de façon manuelle ou à l'aide d'une foreuse. Le but de cette technologie est non seulement d'améliorer la gestion des prélèvements des eaux souterraines mais aussi d'éviter les puits à grand diamètre et ainsi donc protéger les populations car ces dernières sont exposées aux nombreux accidents entraînant la mort du bétail et même des enfants. Cette technologie peu connue au Burkina Faso a déjà fait ses preuves dans de nombreux pays dans le monde. Au Pakistan, les agriculteurs à la quête d'une alimentation en eau d'irrigation fiable ont déjà adopté la technologie du tubewell (Watto & al, 2018). En Inde, le coût relativement bas de l'installation et l'utilisation du tubewell a fait croître considérablement le nombre d'utilisateurs de cette technologie dans les années 2012 (Shah & al, 2012). Ce qui porte à croire que cette technologie peut être une bonne alternative aux nombreux grands puits sur les plaines agricoles au Burkina Faso si toutefois les conditions sont réunies.

II.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.2.1 Localisation de la zone d'étude

Le périmètre irrigué de Bama est situé dans la plaine alluviale du Kou dans l'Ouest du Burkina Faso précisément dans le bassin du Kou entre les longitudes 4°28'0'' et 4°23'0'' W et les latitudes 11°20'0'' et 11°11'0'' N (Figure 1). Il couvre 1260 ha de superficie et est accessible par la nationale RN9 à partir de Bobo Dioulasso.

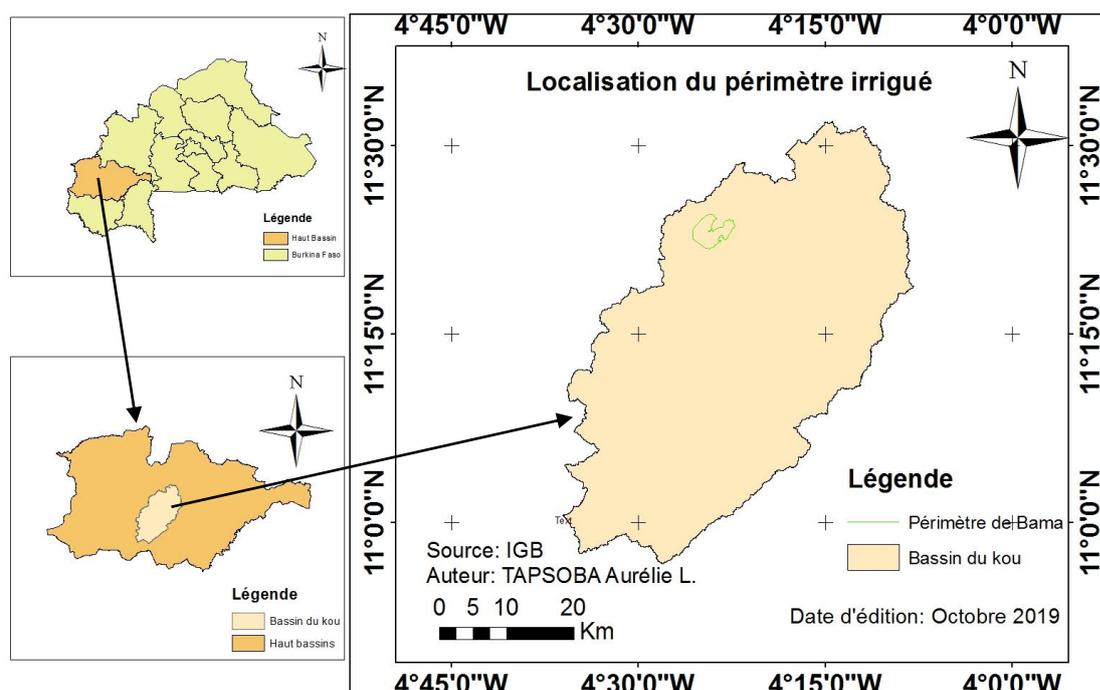


Figure 1 : Cartographie de la localisation de la zone d'étude

II.2.2 Contexte climatique

Le climat du bassin du Kou dans lequel se situe la plaine irriguée est de type Soudanien. Ce bassin fait partie de la zone la plus arrosée du Burkina Faso avec une pluviométrie annuelle variant entre 750 mm et 1200 mm (Figure 2). Dans cette zone, deux saisons très contrastées peuvent être observées :

- une saison sèche qui s'étend d'Octobre à Avril régulée par l'harmattan, un vent sec et poussiéreux.
- une saison pluvieuse qui s'étend de Mai à Septembre caractérisée par la mousson qui donne des vents chargés d'humidité.

La température moyenne annuelle maximale est de 37° tandis que la moyenne annuelle minimale est de 20° (station de la vallée du Kou). La durée moyenne d'ensoleillement est de 7h42 mn. L'humidité relative de l'air se situe entre 20 et 40% pendant la saison sèche tandis qu'en saison pluvieuse elle varie entre 70 et 80%.

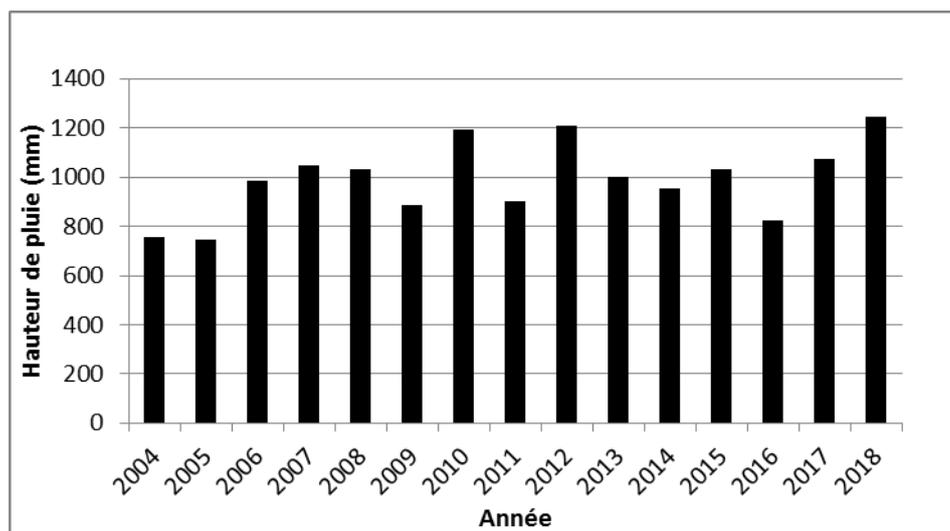


Figure 2 : Variation de la pluviométrie annuelle de 2004 à 2018

II.2.3 Contexte hydrologique

Le bassin versant du Kou fait partie du grand bassin du Mouhoun qui couvre environ 91 036 km² (Pieyns et al., 2017). La rivière du Kou, longue d'environ 70 km est le plus grand affluent du Mouhoun en rive droite. C'est une rivière pérenne qui traverse tout le bassin du Kou et draine les eaux sur environ une surface de 1860 km². Elle prend sa source vers la localité de Péni au sud-ouest de Bobo Dioulasso, à environ 500 m d'altitude et est alimentée par plusieurs sources dont les principales sont les sources Pesso/Desso et de Nasso/Guinguette qui débitent 6000 m³/h d'eau et constituent d'ailleurs l'essentiel du débit de base de la rivière. Plusieurs affluents se relient au Kou (Figure 3) à savoir le Farakoba, le Suo, le Kiéné, le

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Wengué à l'ouest et le Bingbelé, le Niamé, le Wé au Nord qui sont pour la plupart des rivières temporaires (*Tirogo, 2016*). Ils se remplissent pendant la saison pluvieuse et tarissent pendant la saison sèche. Une bonne partie des eaux de ce bassin sert à irriguer le périmètre de Bama qui s'étend sur 1260 ha et une partie des eaux des sources de la guinguette sont prélevées par l'ONEA pour alimenter en eau potable la ville de Bobo Dioulasso.

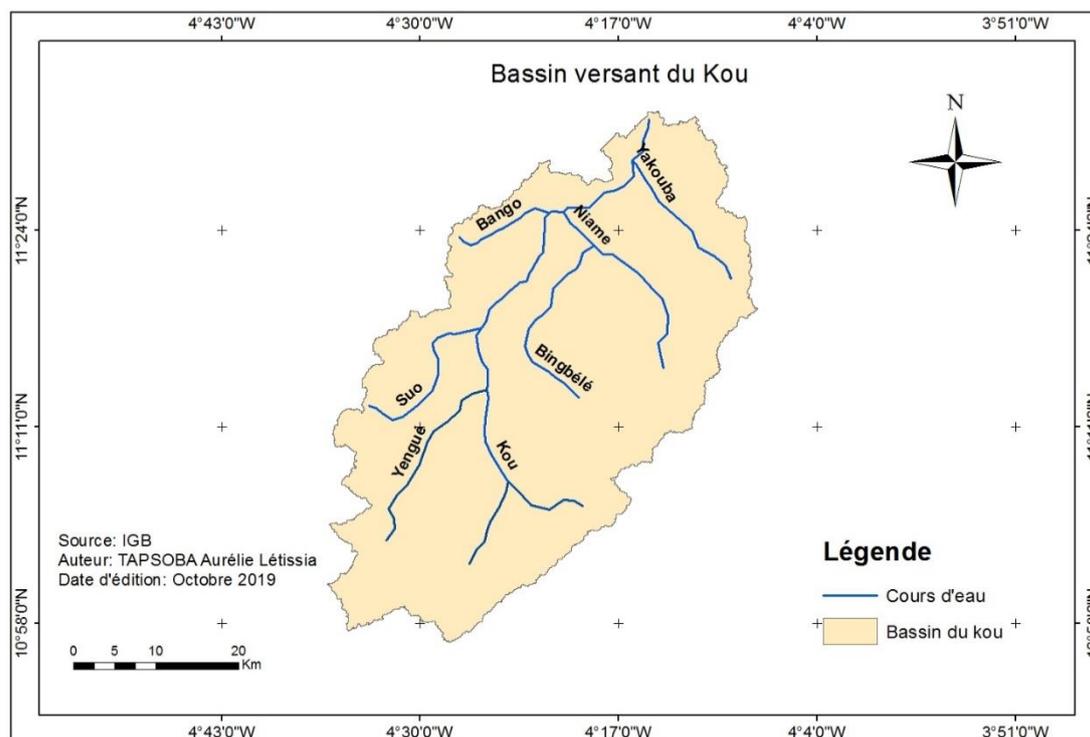


Figure 3 : Cartographie du Bassin versant du Kou

II.2.4 Les sols et la végétation

Les sols du bassin du Kou résultent pour la plupart de l'érosion sur les matériaux gravillonnaires, les vertisols sur alluvions ou matériaux argileux, les sols ferrugineux tropicaux. Selon la profondeur on peut distinguer :

- Les sols profonds (>100 cm) :
 - Des sols argileux sableux en surface, argileux en profondeur
 - Des sols limono-argileux en surface, argileux en profondeur
 - Des sols sableux en surface, argileux en profondeur
- Les peu profonds (<40 cm) : ce sont essentiellement des sols gravillonnaires (*Tirogo, 2016*).

La végétation de la vallée du Kou est dominée par la savane et les forêts claires. On rencontre des îlots de forêts comme les forêts classées des sources du Kou, de Koilina, de Dinderesso et aussi quelques surfaces reboisées par les services forestiers.

II.2.5 Contexte géologique

Des formations essentiellement gréseuses, carbonatées et argilifiées caractérisent la géologie de la zone (Figure 4). Elles s'empilent les unes sur les autres en couches subhorizontales et sont affectées d'un léger pendage de 2° vers le nord-ouest (*Tirogo, 2016*). Il s'agit de :

- **La formation des Grès Fins Glauconieux (GFG ou grès de Sotuba).**

C'est une formation peu fracturée d'une épaisseur qui varie entre 150 et 500 m. Elle est constituée de grès fins qui passent à de l'argile au contact des grès du Kawara Sindou. La partie inférieure des GFG est composée d'une alternance de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès très fins.

- **La formation de Grès à yeux de Quartz ou Grès à Granules de Quartz (GGQ)**

La formation GGQ est constituée de grès quartzite, du grès grossiers à gros galets et est marquée par la présence de granules de quartz. Elle repose sur une discordance sur la formation des GFG. Son épaisseur varie de 0 à 500 m. C'est une formation fracturée.

- **La formation des silistones Argilites et Carbonates de Guéna Sourou Koudinga (SAC1)**

La formation SAC1 est constituée de grès, de silistone et de quelques bancs carbonatés mais au contact avec la formation GGQ, elle est constituée de grès fin rose, de minces niveaux d'argilite et de calcaire dolomitique. C'est une formation hétérogène d'une épaisseur estimée à 300 m.

- **La formation des Grès Fins Roses (GFR)**

Elle est épaisse d'environ 100 m et occupe environ 25 km² dans le bassin du Kou. Cette formation s'intercale entre les silistones Argilites et Carbonates de Guéna SourouKoudina et est formée de grès-quartzites fins, micasés et glauconieux.

- **Les dolorites et gabbros**

Elles forment des chaînes de collines ou des collines isolées alignées suivant une direction SSW-NNE à l'affleurement dans l'Ouest du bassin. Il s'agit de dykes d'extension kilométriques recoupant l'ensemble des formations.

Quant aux formations superficielles de la zone, elles sont formées de latérites, d'alluvions argileuses, sablo-argileuses ou sablo limoneuses provenant de la décomposition du substratum gréseux. L'épaisseur de ces couches superficielles peut aller jusqu'à 40 m.

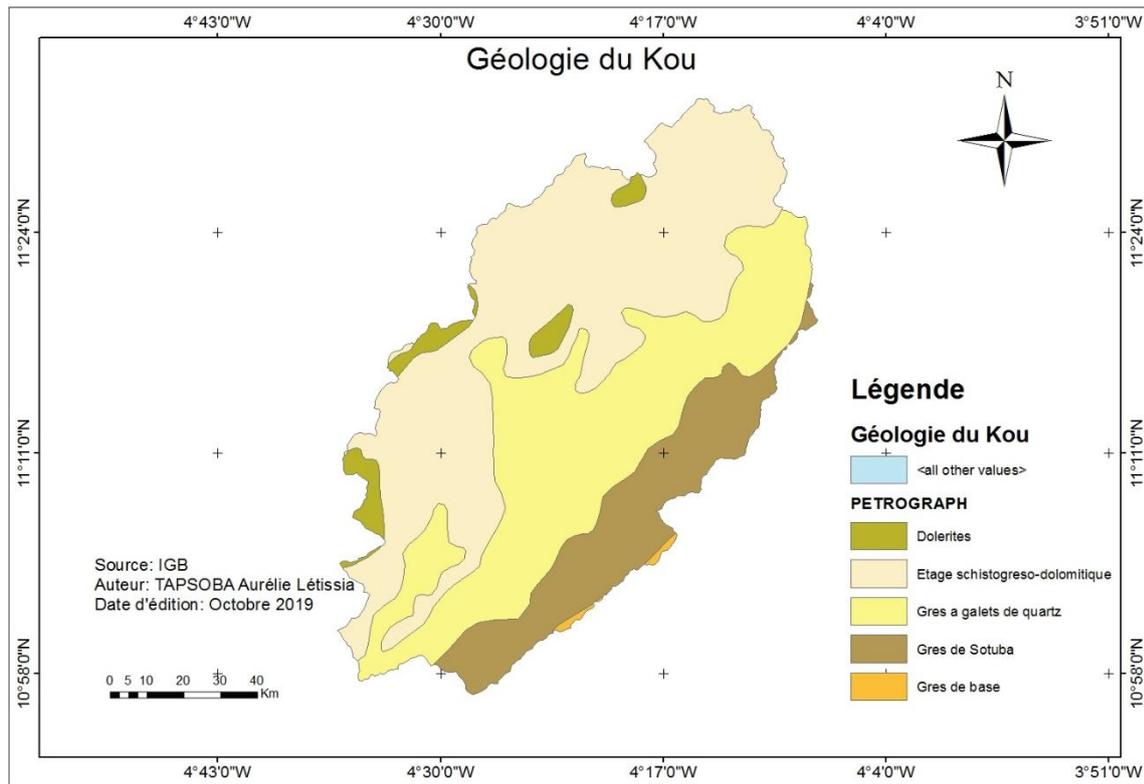


Figure 4 : Cartographie de la géologie du Kou

II.2.6 Contexte hydrogéologique

Le bassin du Kou repose sur un système d'aquifère de la zone sédimentaire ancien. Les perméabilités des nappes de ces systèmes aquifères sont importantes, ce qui les rend souvent très productives.

L'intense fracturation des formations gréseuse a eu pour conséquence l'accumulation et le stockage d'importants volumes d'eau dans ces formations pour constituer essentiellement quatre niveaux aquifères (Sauret, 2013) :

- **Aquifère des Grès Fins Glaucוניeux (GFG)**

Il est situé entre deux roches imperméables et est constitué d'une série gréseuse. Dans sa partie inférieure, on retrouve une épaisse couche imperméable de nature argileuse plus ou moins gréseuse. Il a une épaisseur d'environ 100 à 150 m et renferme une nappe captive avec une transmissivité de l'ordre de $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ qui est sollicitée par certaines industries de la ville de Bobo Dioulasso comme l'ONEA.

- **Aquifère des Grès à yeux de Quarts ou Grès à Granules de Quartz (GGQ)**

La formation GGQ possèdent deux niveaux aquifères séparés par une couche lenticulaire d'argile discontinue l'un de l'autre. Il est constitué de grès tendres blanc-crème ou rouge très poreux, perméable et est souvent situé entre deux roches imperméables. La transmissivité de cet aquifère est de l'ordre de $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

- **Aquifère silistones Argilites et Carbonates de Guéna SourouKoudinga (SAC1)**

Les SAC1 renferment dans leur partie inférieure une roche réservoir de grès rouge, très grossiers et glauconieux. Le toit de la nappe est constitué d'une épaisse couche de calcaires dolomotisés, imperméables. C'est l'un des aquifères les plus productifs de la série sédimentaire avec une transmissivité variant entre $5,6.10^{-4}$ à $1,1.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. L'épaisseur de cette couche est d'environ 80 m.

- **Aquifère Grès Fins Roses (GFR)**

L'aquifère de GFR est constitué de grès quartzites très fins minacés et glauconieux, de couleur rose dominante. Il est le réservoir d'une nappe peu profonde de moins de 20 m.

- **L'aquifère alluvial**

Cette nappe est exploitée par les populations à l'aide des puits traditionnels qu'on retrouve dans les communes de Bama. Son épaisseur varie de 5 à 55 m.

III. MATERIELS ET METHODES

Dans cette partie nous avons adopté une démarche méthodologique par objectif spécifique. Divers données et matériels ont été utilisés pour l'ensemble des différentes investigations de terrain et traitement de données.

III.1 MATERIELS UTILISES

III.1.1 Données utilisées

Pour mener à bien le travail nous avons eu recours à certaines données :

- Les données climatiques des années 2017 et 2018 de la station de la vallée du Kou située aux abords du périmètre pour le calcul de l'évapotranspiration de référence et l'étude de la recharge ;
- Les données piézométriques de la zone sur deux ans pour l'étude de la fluctuation piézométrique ;
- Les différentes cartes géographiques, géologiques, hydrographiques de la zone, obtenues à partir des couches et découpages de l'Institut Géographique du Burkina (IGB) et du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso (BUMIGEB) ;
- Les données de l'enquête terrain conçu et administré par nous-même.

III.1.2 Matériel physique

La récolte des données sur le terrain a nécessité l'utilisation du matériel physique suivant :

- Un GPS Garmin pour la prise des coordonnées (Photo1) ;
- Un tube en fonte de 60 mm pour la mise en place du tubewell (Photo2) ;
- Un tube en PVC crépiné pour l'équipement du tubewell ;
- Une motopompe 36 m³/h pour l'irrigation ;
- Un seau de 9 l et un chronomètre pour la mesure des débits ;
- Double anneau de Muntz(Photo 3).



Photo 1 : GPS Garmin



Photo 2 : Tube en fonte



Photo 3 : Double anneau de Muntz

III.1.3 Matériel végétal

Pour une meilleure expérience nous avons suivi une campagne de riz avec l'utilisation du matériel végétal suivant :

- Orylux
- Samangrin
- Urée
- NPK

III.1.4 Outils informatiques

Le traitement des données a nécessité l'utilisation de certains outils informatiques que sont :

- **Pack office** pour le traitement des données chiffrées et le traitement du texte
- **Croptwat** pour le calcul de l'évapotranspiration de référence ;
- **Global Mapper** pour la délimitation du bassin versant ;
- **ArcGis 10.3.1** pour l'établissement des différentes cartes ;
- **Minitab** pour la caractérisation des sols ;
- **Soil Water Characteristics** pour la détermination des humidités du sol et aussi les types de sols ;
- **Google earth 7.3.2** pour la délimitation de la zone d'étude.

III.2 METHODOLOGIE

III.2.1 Diagnostic des pratiques actuelles d'utilisation de la ressource en eau des cultures.

Le diagnostic s'est fait en deux phases : l'enquête et les observations sur le terrain. La première phase s'est déroulée sous forme de discussion brève et individuelle afin de connaître les habitudes des producteurs et de dénombrer à peu près les infrastructures présentes sur le site ainsi que leur localisation (Photos 4 et 5).

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »



Photo 4 : Séance d'enquête (a)



Photo 5 : Séance d'enquête (b)

La seconde phase s'est déroulée sur plusieurs jours. Nous avons pu observer les habitudes quotidiennes des producteurs. Une vingtaine de producteurs a été particulièrement suivi, ce qui nous a permis d'estimer le volume d'eau qu'ils prélèvent par pompage (Photo 6 et 7). En effet, ces producteurs pompent l'eau dans de grands puits à l'aide des pompes à moteur.



Photo 6 : Prise de coordonnées



Photo 7 : Grand puits

Nous avons estimé le débit pompé par la méthode volumétrique en utilisant un seau calibré et un chronomètre. L'opération consiste à déterminer le temps qu'il faut pour remplir un seau d'eau

Les relations suivantes (Equation 1) permettent de calculer le volume d'eau prélevé par irrigation :

Équation 1 : Calcul du débit

$$Q[m^3/s] = \frac{V[m^3]}{T[s]}$$

Avec :

- Q : débit en m³/s
- V : volume d'eau correspondant à la capacité du seau en m³
- T : temps de remplissage du seau en s

En connaissant le débit nous pouvons alors estimer le volume du prélèvement par la relation suivante (Equation 2) :

Équation 2 : Calcul du volume d'eau prélevée

$$V_{ep} [m^3] = Q_{mes} \cdot N_{hp} \cdot N_{jp} \cdot N_s$$

Avec :

- V_{ep} : Volume d'eau prélevée ;
- Q_{mes} = débit mesuré en mètre cube par heure ;
- N_{hp} = Nombre d'heures de pompage par irrigation ;
- N_{jp} = Nombre de jours de pompage par semaine ;
- N_s = Nombre de semaines de pompage par saison.

III.2.2 Evaluation des besoins en eau des cultures en contre saison

Les besoins en eau correspondent au volume d'eau indispensable à la plante. Son évaluation peut être faite par deux méthodes : la méthode directe et la méthode indirecte. La méthode indirecte sera considérée dans notre cas et cela passe par un certain nombre d'opérations. Pour mener à bien cette étape, des hypothèses ont été émises :

- ✓ **Hypothèses 1** : La principale spéculature est le riz
- ✓ **Hypothèses 2** : 2/3 de la superficie totale de la plaine reste inexploitée pendant la saison sèche. Ce qui va correspondre à notre surface d'étude.
- ✓ **Hypothèse 3** : la contre saison dure 8 mois

III.2.2.1 Caractérisation du sol : mesure d'infiltration

Les mesures d'infiltration ont pour but la caractérisation du sol. Elles ont été faites en utilisant la méthode des doubles anneaux de Muntz (Photo 8). Le principe du double anneau est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps.

Principe de mesure : C'est une méthode qui consiste à enfoncer à 5 cm dans le sol de façon concentrique deux anneaux de diamètre légèrement différent à l'aide d'une planche et d'un marteau. L'enfoncement doit être de manière lente et régulière afin d'éviter de perturber le sol aux abords de l'installation. L'eau est injectée au sein de l'anneau interne. L'anneau extérieur est appelé anneau de garde et a pour fonction de garantir une infiltration verticale dans l'anneau central. Les mesures sont faites à l'aide d'une règle graduée placée de manière verticale à l'intérieur du petit anneau.

Cette caractérisation va nous permettre de trouver les données de la réserve utile et donc

d'estimer les besoins en eau des cultures en tenant compte de la nature du sol.



Photo 8 : Double anneau de Muntz

Mode de traitement : Les données sont traitées directement par le logiciel **Minitab 18** en utilisant la méthode aux moindres carrés de l'infiltration cumulée pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}).

Cumul des hauteurs d'infiltration : $h_t[mm] = \sum_{i=0}^{i=t} h_i$

Infiltration moyenne : $I_{moy-t}[mm/h] = \frac{dh[mm]}{dt[h]}$

Infiltration cumulée : $I_t = K_{sat} \cdot t + \frac{1}{b} (i_0 - K_{sat}) \cdot (1 - e^{-bt})$

Avec :

t = temps écoulé depuis l'instant t_0 en h

b = paramètre d'ajustement de l'équation de la courbe de régression

K_{sat} = conductivité hydraulique en mm/h

i_0 = Infiltration moyenne

Par la suite, les humidités du sol sont déterminées grâce au logiciel SPAW. Ce qui permet d'estimer la réserve utile grâce à l'équation :

Équation 3 : La formule de la réserve utile

$$RU(cm/m) = \theta_{FC} - \theta_{WP}$$

Avec :

- θ_{FC} = Humidité au point de flétrissement
- θ_{WP} = Humidité à la capacité au champs

III.2.2.2 L'évapotranspiration de référence ET_0

L'évapotranspiration de référence est la quantité d'eau évapotranspirée par une culture de référence (gazon) couvrant totalement le terrain, ayant une hauteur de quelques centimètres à son stade de développement maximal, dont l'alimentation en eau n'est pas contraignante et qui n'est soumise à aucune limitation d'ordre nutritionnelle, physiologique et pathologique.

Plusieurs formules empiriques ont été proposées par les chercheurs pour le calcul du ET_0 . Toutes ces formules font intervenir les facteurs climatiques tels que la chaleur, le vent, l'humidité. Il s'agit des formules suivantes :

- Blaney et Criddle (Equation 3)
- Thornthwaite (Equation 4)
- Penman modifiée (Equation 5)

Équation 4 : La formule de Blaney et Criddle

$$ET_0 \text{ Blaney et Criddle [mm]} = (15 + 0,8t) \cdot \frac{H}{100}$$

Avec :

- ET_0 : Evapotranspiration de référence
- t : température moyenne en °C
- H : durée en heure du jour de la période considérée

Équation 5 : La formule de Thornthwaite

$$ET_0 \text{ Thornthwaite [mm]} = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I}\right)^\alpha \cdot F(\lambda)$$

Où

$$I = \sum_{m=1}^{12} i_m \qquad i_m = \frac{t^{1,514}}{5} \qquad \alpha = 0,016 \cdot I + 0,5$$

Avec :

- ET_0 : Evapotranspiration de référence
- t : température moyenne mensuelle en °C
- I : indice thermique annuel ;
- $F(\lambda)$: facteur dépendant de la latitude

Équation 6 : La formule de Penman modifiée

$$ET_{0 \text{ Penman modifiée}} = C \cdot R_n + (1 + w) \cdot f(U) \cdot (e_a - e_d)$$

Avec :

- C : facteur de correction pour comparer les conditions météo diurnes et nocturnes
- R_n : rayonnement net, en évaporation équivalent (mm/j)
- W : facteur de pondération lié à la température
- $f(U)$: facteur lié à la vitesse du vent
- $e_a - e_d$: $P(T_a) - P(T_r) = D_a$ = Déficit hydrique de l'air

La méthode par la formule de Penman modifiée a été appliquée grâce au logiciel Cropwat qui tient compte de plusieurs facteurs climatiques.

III.2.2.3 L'évapotranspiration maximale ETM

L'Evapotranspiration maximale d'une culture est la quantité d'eau maximale évapo-transpirée, à un stade végétatif donné, dans les conditions climatiques données, lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant et que les conditions agronomiques sont optimales. Elle est estimée à partir de la relation suivante (Equation 6) :

Équation 7 : Evapotranspiration maximale ETM

$$ETM = K_c * ET_0$$

Avec :

- ETM : Evapotranspiration maximal
- K_c : coefficient cultural
- ET_0 : Evapotranspiration de référence

III.2.2.4 La dose pratique D_p

La dose pratique est la hauteur d'eau nécessaire pour compenser l'évapotranspiration de la plante. Elle est calculée à partir de la formule suivante (Equation7) :

Équation 8 : Dose pratique

$$D_p(mm) = p * RU(mm) = p * Z_r(mm) * (\theta_{fc} - \theta_{wp})$$

Avec :

- D_p = Dose Pratique
- RU = Réserve Utile
- θ_{fc} = Humidité volumétrique à la capacité au champ
- θ_{wp} = Humidité volumétrique au point de flétrissement
- Z_r = profondeur racinaire de la culture
- P = facteur de tarissement dépendant du type de culture et de l'ETM

III.2.2.5 La dose Brute

La dose brute correspond au volume des besoins en eau brute. Elle est calculée à partir de la relation suivante (Equation 8) :

Équation 9 : Dose brute

$$Db(mm) = \frac{D_p(mm)}{E_{ig}}$$

Avec :

- Db = Dose brute
- D_p = Dose pratique
- E_{ig} = Efficience globale de l'irrigation

III.2.3 Evaluation de la quantité d'eau mobilisable pendant la contre saison

La quantité d'eau mobilisable peut correspondre dans notre cas à la recharge en termes de volume. Sa quantification peut s'effectuer par plusieurs méthodes. Toutes les méthodes se basent sur différentes considérations et chacune de ces considérations s'accompagnent d'incertitudes. L'utilisation d'au moins deux méthodes peut permettre de se rassurer sur la qualité des résultats. (Koïta & al., 2017)

III.2.3.1 Caractérisation de la fluctuation piézométrique de la nappe

L'objectif de cette caractérisation est de déterminer les niveaux maximum et minimum atteints par les fluctuations et aussi déterminer le cycle de recharge en vue de sa quantification.

Le niveau piézométrique d'une colonne d'eau peut être défini comme étant le niveau de la colonne d'eau qui équilibre la pression hydrostatique régnant en bas de cette même colonne. Il est déterminé par la relation suivante (Equation 9) :

Équation 10 : Niveau piézométrique

$$H[m] = Z[m] - n[m]$$

Avec :

- H= niveau piézométrique
- Z= altitude de l'ouvrage
- n= profondeur de l'eau dans l'ouvrage

La caractérisation de la nappe doit être faite sur au minimum une année complète pour être fiable. Dans notre cas, nous analyserons les données sur deux années consécutives (2017 et 2018) et sur la base des données de quatre piézomètres. Ces données nous ont été fournies par la DGRE.

Nous pouvons donc analyser la variation temporelle du niveau de la nappe et évaluer le stock d'eau renouvelé.

La variation temporelle encore appelé fluctuation piézométrique représente l'évolution moyenne du niveau piézométrique et en fonction du temps.

L'estimation de la recharge par la méthode de la fluctuation piézométrique suppose que ces variations sont dues à une recharge ou à une décharge. Cette variation permet donc de mettre en évidence les phases de montée ou de descente du niveau piézométrique qui correspondent respectivement aux phases de recharge et de décharge.

Les fluctuations dans 4 différents piézomètres placés à différentes positions nous ont permis de quantifier la recharge par la méthode de la fluctuation piézométrique à travers la relation suivante(Zoure *et al.*, 2019) (Equation 10) :

Équation 11 : recharge

$$R[mm] = S_y \cdot \Delta h[mm]$$

- R: recharge
- S_y : porosité de drainage considéré
- Δh : la fluctuation piézométrique correspond à la différence entre la charge piézométrique des hautes eaux et celle des basses eaux

III.2.3.2 La méthode du bilan de Thornthwaite

Cette méthode est basée sur la notion du bilan hydrique à l'échelle du bassin versant. Elle est fondée sur l'hypothèse selon laquelle le total des apports d'eau dans le bassin est égale au total des sorties d'eau du bassin sur un intervalle de temps donné.

Le bilan de THORNTHWAITE suppose que la pluie tombée sur le bassin versant prend quatre chemins (Figure 5) :

- L'évapotranspiration réelle (mm) : ETR
- Le ruissellement (mm) : R ;
- L'infiltration (mm) : I ;
- Le stockage dans le sol (mm) : ΔS

Ce qui peut être traduit par la relation suivante (Equation 11) :

Équation 12 : Bilan de Thornthwaite

$$P = ETR + R + I + \Delta S$$

Avec

- ETR : Evapotranspiration réelle (mm)
- R : Ruissellement (mm)
- I : L'infiltration (mm)
- ΔS : Le stockage dans le sol (mm) :

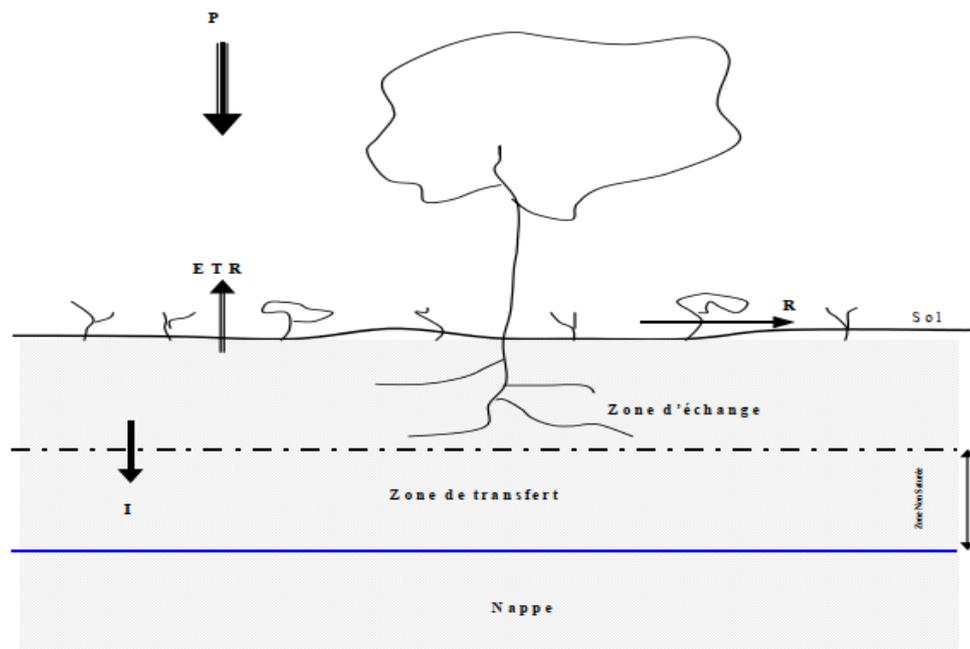


Figure 5 : Schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite (Dakouré, 2003)

La détermination du paramètre I qui représente l'eau alimentant la nappe passe par la quantification des autres termes.

La méthode consiste à calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la comparer avec les précipitations du mois considéré.

- Si $P \geq ETP$: Les précipitations sont excédentaires.

- Si $P \leq ETP$ les précipitations sont déficitaires.

Calcul des différents paramètres :

➤ Capacité de stockage en eau CSE

La capacité de stockage en eau peut être estimée par la relation suivante (Equation 12)

Équation 13 : Formule de la capacité de stockage en eau

$$CSE (mm) = 2 * RU (mm)$$

Avec :

- CSE= Capacité de stockage en eau
- RU= Réserve Utile

Sur la base des études morpho-pédologiques dans le bassin du Kou, le Bureau National des Sols (BUNASOLS) a fourni un rapport technique dans lequel nous avons tiré les valeurs de RU qui nous ont permis d'estimer le CSE. (Voir annexe D)

➤ L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus que sont l'évaporation et la transpiration. Plusieurs méthodes permettent de calculer l'évapotranspiration. Dans notre cas nous allons utiliser la méthode de Thornthwaite (Equation 13).

Équation 14 : Formule de l'évapotranspiration potentielle

$$ETP[mm] = 16. \left(\frac{10. t}{I} \right)^\alpha . F(\lambda)$$

Où

$$\alpha = 6,75. 10^{-7} \times I^3 - 7,71. 10^{-5} \times I^2 + 1,79. 10^{-2} \times I + 0.49239$$

Avec

- ETP : Evapotranspiration potentielle
- I , t et $F(\lambda)$ sont les mêmes paramètres définis à l'équation 4.

➤ La Réserve Facilement Utilisable

Elle se résume aux deux équations suivantes : $RFU=0$ si $P < ETP$

$$RFU=P-ETP \text{ si } P > ETP$$

➤ La lame d'eau ruisselée

La lame d'eau peut être déterminée à partir de la relation suivante (Equation 14) :

Équation 15 : Formule de lame d'eau ruisselée

$$R = Cr * Lep$$

Avec

- Cr : Coefficient de ruissellement
- Lep : Lamme d'eau précipitée effectivement tombée sur le sol

➤ **La valeur de la hauteur d'eau infiltrée**

La hauteur d'eau infiltrée peut être déterminée en retranchant de la précipitation la lamme d'eau ruisselée et la hauteur d'eau évapo-transpirée. Cette hauteur d'eau correspond à la recharge. Elle est estimée par la relation suivante (Equation 15)

Équation 16 : Formule de la hauteur d'eau infiltrée

$$I = P - ETR - R = Hr$$

III.2.4 Technologie du tubewell

Un tubewell est un puits de diamètre compris entre 60 et 100 mm servant généralement à capter la nappe phréatique. Deux tubewells et quatre micropiézomètres ont été réalisés afin de permettre respectivement aux producteurs de pomper l'eau pour l'irrigation et faire le suivi du niveau de l'eau. La réalisation des micropiézomètres se fait exactement suivant la même méthodologie que celle des tubewells. Ces piézomètres vont permettre le suivi de la nappe en fonction des différents pompages et ainsi donc comprendre comment se fait la recharge.

III.2.4.1 Choix du site

Le choix du site d'implantation se fait selon plusieurs critères. Une recherche bibliographique suivi d'une investigation doivent être faites afin d'appréhender la nature du sol et ainsi donc étudier la faisabilité de l'installation.

Le choix du site d'implantation des tubewells doit tenir compte des risques de pollution et de surexploitation de la ressource. Ainsi donc il devra répondre aux normes suivantes :

- Situé au minimum à 100 m des autres ouvrages hydrauliques de même envergure,
- Situé au minimum à 200 m des décharges toxiques (hydrocarbures, produits phytosanitaire...),
- Situé au minimum à 35 m des bâtiments d'élevage et annexes comme les fosses fumières.

Le choix du site doit également tenir compte de la nature du sol. La réalisation se faisant grâce à la force humaine et la pression de l'eau, le tubewell ne peut donc pas être installé dans les roches dures car difficilement pénétrables. Il convient alors que la texture du sol soit de nature tendre et stable (argile, limon...).

Les ouvrages hydrauliques présents dans la zone doivent également être examinés afin de connaître les caractéristiques et de conclure temporellement sur la présence d'une nappe phréatique à moins de 15m.

III.2.4.2 Matériels utilisés

Le matériel utilisé pour la mise en place du tubewell ainsi que des piézomètres peut être divisé en deux groupes :

➤ **Matériel de forage**

- Une motopompe centrifuge
- Un tube en fonte de 60 mm de diamètre
- Une tête d'emboîtement en fonte
- Un tuyau en plastique
- Des fils en caoutchouc pour les différentes jonctions

➤ **Matériel d'équipement**

- Un tube plein en PVC du même diamètre que le tube en fonte
- Un tube crépiné pour capter les venues d'eau
- Du gravier et du ciment

➤ **Matériel divers**

- Ensemble de sachets plastiques pour le prélèvement des cutting
- Outils divers : pioche, pelle, scie

III.2.4.3 Personnel requis

L'objectif ici étant de minimiser les coûts et de rendre les producteurs autonomes, la mise en place des tubewells et des piézomètres est participative. Ces technologies sont installées avec et par les producteurs. Le personnel comprend :

➤ Une équipe d'ouvriers

- Une personne chargée de réguler le fonctionnement de la motopompe
- Une équipe d'au moins trois ouvriers chargés du fonçage et une autre équipe pour le relai.

➤ Un coordonnateur ou superviseur des travaux

III.2.4.4 Méthodologie de réalisation du tubewell

➤ **Réalisation du tubewell**

La méthodologie de l'installation du tubewell repose essentiellement sur deux aspects :

La pression de l'eau grâce à la motopompe et la force humaine exercée sur le tubage en fonte

La procédure de la réalisation du tubewell est la suivante :

- Rattacher le tubage en fonte à un tuyau d'acheminement de l'eau relié à une motopompe par le haut ;
- Maintenir le tube en fonte de façon verticale sur le point de fonçage ;
- Exercer une pression de vas et viens sur le sol grâce à la force humaine (Photo 9) ;
- Injecter dans le trou à l'aide de la motopompe au fur et à mesure par la méthode du « flop » qui consiste à augmenter soudainement la pression de l'eau afin d'expulser les débris hors du trou de forage (Photo 10).

➤ **L'équipement**

L'équipement des tubewell s'apparente à celui des forages. Il s'agit de :

- Un tube en pvc crépine placé le long des venues d'eau afin de les capter.
- Un tube en pvc plein pour maintenir les parois et une partie hors sol d'au moins 20 cm.
- Un massif filtrant composé de gravier versé dans le trou pour filtrer l'eau.

Nous avons également installé quatre piézomètres pour le suivi de l'évolution de la nappe phréatique. Ces piézomètres ont été réalisés par la même procédure que les tubewells.

➤ **Le développement et mise en service**

Le développement est l'opération consistant à éliminer le plus possible les éléments fins contenus entre les pores des éléments les plus grossiers permettant ainsi d'améliorer considérablement la productivité de l'ouvrage. Il est indispensable pour les tubewell. Cette opération permet :

- De prévenir le colmatage des équipements
- D'améliorer la productivité du tubewell
- De stabiliser la formation autour du tubewell
- D'obtenir une eau claire

Le développement du tubewell se fait par pompage continue sur au moins 1h de temps, l'eau est pompée à l'aide d'une motopompe jusqu'à l'obtention complète d'une eau claire et limpide.

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Un branchement complet d'irrigation est ensuite installé avec des vannes pour permettre la mise en eau régulée des différentes parcelles (Photos 9 à 12).



Photo 9 : Réalisation du tubewell



Photo 10 : Réalisation du tubewell



Photo 11 : Installation des tuyaux d'irrigation



Photo 12 : Vannes d'irrigation

III.2.4.5 Productivité des tubewells

➤ Débit mesuré

Les mesures de débit se font grâce à la méthode volume-temps. Un seau de 9l sert à recueillir l'eau tout en chronométrant le temps mis à l'aide d'un chronomètre. Cela nous permet de déterminer le débit d'exploitation des tubewell en fonctionnement normal.

Le débit est déterminé par la formule de l'équation 1.

➤ Suivi périodique

Afin de suivre l'évolution de la nappe, des micro piézomètres ont été installés de part et d'autre des tubewells et des mesures ont été prises à intervalle de temps réguliers. Ces

mesures sont faites avant chaque irrigation. Elles consistent à relever le niveau statique de l'eau juste avant l'irrigation dans les tubewells et aussi dans les piézomètres de suivi.

L'objectif de ce suivi est de :

- suivre l'évolution du rabattement
- mieux comprendre le mécanisme de recharge de la nappe sur le site en suivant les montées d'eau ;
- établir le lien entre les pluies et la recharge ;
- établir le lien entre la recharge et les caractéristiques du sol de la zone d'étude.

➤ **Parcelles d'irrigation**

Deux parcelles de 0.25ha ont été considérées pour le suivi d'une campagne du riz irrigué grâce au tubewell afin de conclure sur la capacité de ces derniers à assurer l'irrigation de contre saison.

Deux systèmes d'irrigation ont été utilisés afin de mettre en évidence les bonnes pratiques de gestion de l'eau à travers les tubewells:

- La pratique paysanne (PP) : Elle consiste à irriguer les parcelles à chaque fois qu'il n'y a plus d'eau apparente
- L'alternate Wetting et Drying (AWD): elle consiste à enfoncer de façon représentative des tubes perforés de 30cm dans le sol à l'intérieur des parcelles et de n'irriguer les parcelles que lorsque qu'il n'y a plus d'eau apparente dans les tubes. Cette méthode tient compte du confort de la plante et de ses besoins.

Deux variétés de riz ont également été utilisées pour l'expérimentation. Il s'agit du samangrin et de l'orylux.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 DIAGNOSTIC DES PRATIQUES ACTUELLES D'UTILISATION DE LA RESSOURCE EN EAU POUR LES CULTURES DE CONTRE SAISON

Sur le terrain nous avons pu recenser au total 22 grands puits (Figure 7) et une quarantaine de petits puits repartis sur le périmètre. Ces puits servent à l'irrigation pendant la contre saison. Deux ou trois producteurs peuvent pomper dans un même grand puits.

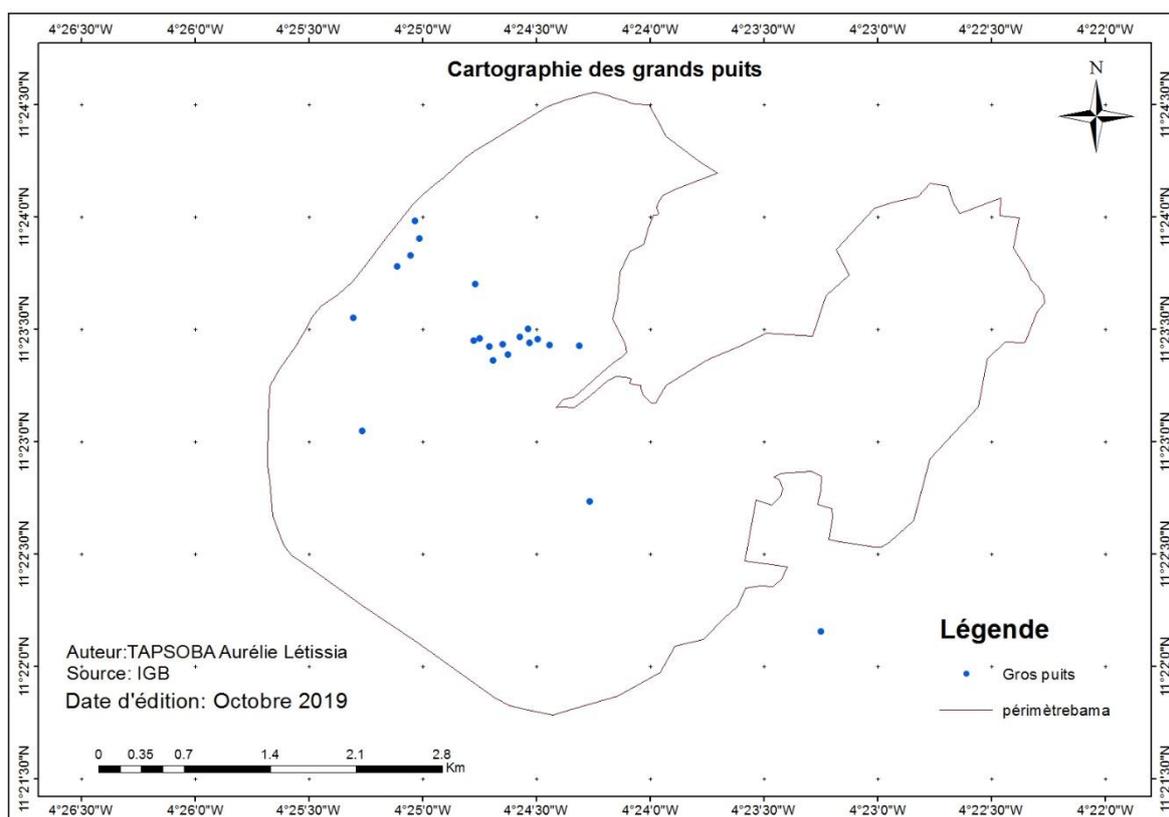


Figure 6 : Cartographie des grands puits

La majorité des puits se trouve sur la partie Nord-Ouest du périmètre. En effet c'est la partie qui rencontre le plus de pénurie d'eau pendant la saison sèche. Les producteurs se trouvant dans cette zone se retrouvent sans eaux dans les canaux pendant la saison sèche, ils sont alors obligés d'avoir recours aux puits à grands diamètres.

Ces puits ont pour la plupart des profondeurs pouvant aller jusqu'à 6m. Il ressort de l'enquête que 80% de ces puits ne tarissent pas, même pendant la saison sèche.

L'utilisation de ces puits nécessite des moyens, principalement une motopompe et du carburant pour l'irrigation des grandes surfaces et de la main d'œuvre pour l'irrigation des petites surfaces à l'aide de seaux ou d'arrosoirs.

Nous avons pu suivre une vingtaine de producteurs (voir Annexe A) afin de connaître le nombre d'heure de pompage, la fréquence et le débit de pompage afin d'évaluer le volume

moyen prélevé. Les résultats du volume d'eau prélevé sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1: Volume d'eau prélevé estimé in situ

Volume moyen prélevé par semaine et par hectare (m ³)	Nombre de semaine d'irrigation par contre saison	Surface (ha)	Volume total prélevé par contre saison (m ³)
285.15	27	840	6 466 521

L'estimation des volumes prélevés in-situ montre que les producteurs prélèvent environ **7700 m³** d'eau en contre saison et par hectare. Pour une superficie totale de 840 ha nous obtenons un volume **6 466 521 m³** par an pour les campagnes de contre saison.

IV.2 EVALUATION DES BESOINS EN EAU DES CULTURES EN CONTRE SAISON

IV.2.1 Caractérisation du sol : mesure d'infiltration

Le tableau suivant représente la nature du sol de façon échantillonnée sur tout le périmètre de Bama. Les valeurs de Ksat (Tableau 2) obtenus sont comprises entre 28 et 44 mm/h si nous considérons les résultats du bloc 4 comme erronés car très éloigné de la tendance commune sur le reste du périmètre.

Tableau 2 : Nature du sol

Blocs	Ksat moy	Nature du sol
Bloc2	31,63	Sandy loam
Bloc3	30,35	Sandy loam
Bloc4	1	Silty clay
Bloc5	40,04	Sandy loam
Bloc7	44,06	Sandy loam
Bloc8	28,82	Silty loam
Moyenne	34,98	Sandy loam
Ecart-type	5.42	

Les résultats obtenus grâce au traitement des données sur le logiciel SPAW nous révèlent les types de sol suivants sur tout le périmètre de Bama :

- Les blocs 2, 3, 5 et 7 ont une conductivité comprise entre 30 et 44 mm/h correspondant ainsi au sol de type sableux-limoneux ;

- Le bloc 8 quant à lui présente une conductivité de 28.82 mm/h et correspond à un sol de type argilo-limoneux ;
- Par ailleurs le bloc 1 du périmètre irrigué nous donne une valeur de conductivité hydraulique de 1mm/h. Ce qui est en déphasage avec les reste des blocs. Cela peut être expliqué par les erreurs de mesures. Cette donnée est donc considérée comme erronée.

En moyenne nous avons une conductivité hydraulique saturée de 34.98 mm/h sur tout le périmètre irrigué de Bama. Le type de sol retenu donc pour le périmètre de bama est sableux-limoneux. Ce qui nous a permis de déterminer les paramètres suivants (Tableau 3) :

Tableau 3 : Caractéristiques du sol

Ksat	34,98 mm/h
OWP	9,3 %
OFC	21,8 %
RU	125 mm/m

Avec une conductivité hydraulique moyenne de 34.98 mm/h nous avons une réserve utile de 125 mm/m idéale pour la culture du riz. Cette réserve utile sera donc considérée dans la suite pour l'évaluation des besoins en eau du riz.

IV.2.2 L'évapotranspiration de référence ET0

La figure 9 est un ensemble de graphiques représentant les valeurs d'ET0 calculées par les méthodes de Blaney et Criddle, de Thornthwaite et Pennan modifiée. Le graphique montre que les valeurs d'ET0 calculées par la méthode de Penman modifiée sont pour la plupart les plus élevées. Elles sont néanmoins les plus fiables car elles tiennent compte de plusieurs paramètres climatiques et sont aussi recommandées par la FAO. Quant aux valeurs obtenues par la méthode Blaney et Criddel, Thornthwaite, elles sont moins précises car tiennent compte de moins de paramètres. Nous allons dans la suite du travail considérer les valeurs obtenues par la méthode de Penman modifiée.

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

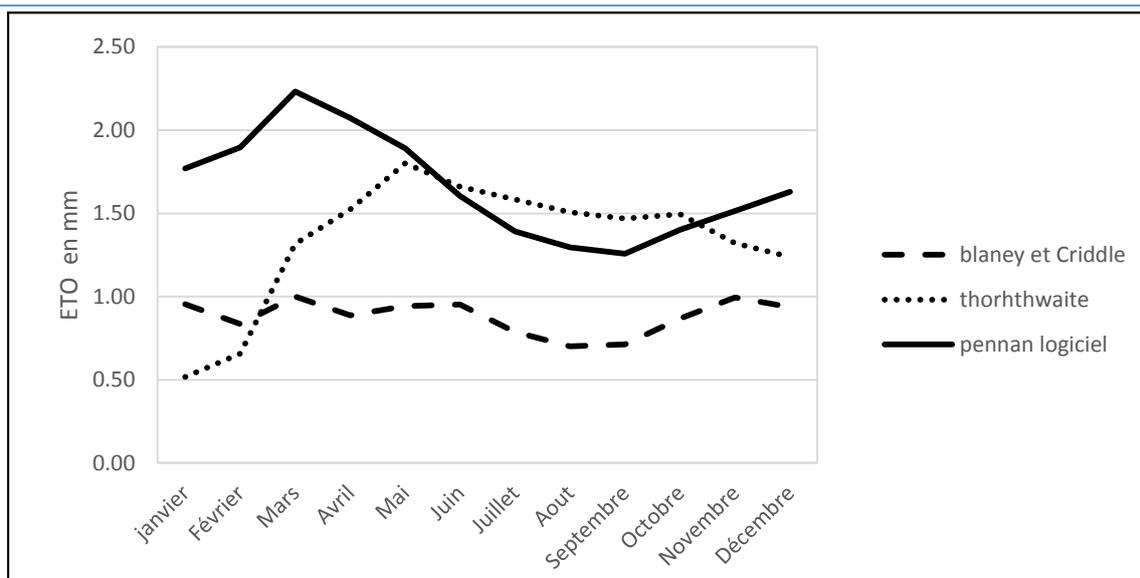


Figure 7 : Courbes comparatives de ET0 estimé par différentes formules

IV.2.3 L'évapotranspiration maximale

Le produit de l'ET0 mensuel par les coefficients culturaux du riz permet de calculer l'évapotranspiration maximale mensuelle. Les coefficients culturaux du riz varient entre 0,8 et 1,2 en fonction de la phase culturale (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs des ETM en fonction du Mois

	ET0 (mm)	Kc	ETM (mm)
Octobre	140,1	1,2	168,14
Novembre	151,5	1,15	174,23
Décembre	163,1	1,1	179,37
Janvier	177,0	0,8	141,61
Février	189,6	1,2	22,47
Mars	223,2	1,15	256,68
Avril	207,3	1,1	228,03
Mai	189,1	0,8	151,28

La valeur de l'ETM la plus élevée se retrouve au mois de Mars tandis que la moins élevée se situe au mois de janvier. Cela s'explique par les conditions de température qui sont respectivement maximales et minimales au mois de Mars et janvier.

IV.2.4 La dose brute (Db)

Les valeurs respectives de l'ETM ont permis de choisir le facteur de tarissement p selon Withers et Vipond (Keita, 2018). Le facteur de tarissement p dépend également de la phase culturale. Il varie entre 0,45 et 0,8. Nous retiendrons dans ce cas la valeur extrême qui est 0,8. La profondeur d'enracinement du riz est égale 0.7 m. Quant à la valeur de la réserve utile, elle correspond à 125 mm/m, valeur correspondant à la différence entre le point de flétrissement de la plante et la capacité au champ trouvée lors de la caractérisation du sol.

Pour des canaux en terre creusés dans un sol sablo-limoneux, on a une efficacité de distribution (Tableau 5) de 87,5 % et une efficacité d'application (Tableau 6) de 60 %.

L'efficacité globale étant égale au produit de l'efficacité de distribution par l'efficacité d'application, nous obtenons une valeur d'environ **52,5 %**.

Tableau 5 : Valeurs de l'efficacité de distribution

	Valeur de Ed			
	Canaux en terre			Canaux revêtus
Type de sol	Sable	Limon	Argile	
Longueur de canal				
Importance (>2000m)	60%	70%	80%	95%
Moyenne (200-2000m)	70%	75%	85%	95%
Faible (<200)	80%	85%	90%	95%

Tableau 6 : Valeurs des efficacités d'application

Méthode	Ea (%)
Irrigation de surface	60
Irrigation par aspersion	75
Irrigation goutte à goutte	90

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Le tableau 7 présente les besoins en eau d'irrigation du riz de la plaine irriguée de Bama.

Tableau 7 : Valeurs des besoins en eau

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
ETM (mm)	112,00	152,00	136,00	141,60	228,00	256,45	227,70	151,20
ETM (mm/j)	3,61	5,07	4,39	4,57	8,14	8,27	7,59	4,88
p	0,70	0,60	0,70	0,60	0,45	0,45	0,45	0,60
Zr	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
RU (mm)	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00
RFU (mm)	61,25	52,50	61,25	52,50	39,38	39,38	39,38	52,50
A (ha)	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00
Dp (m ³)	514500	441000	514500	441000	330750	330750	330750	441000
Db (m ³)	970754,72	832075,47	970754,72	832075,47	624056,60	624056,60	624056,60	832075,47
Volume des besoins en eau (m ³)	6309905,66							

Nous pouvons constater que le volume des besoins en eau le plus élevé est celui du mois d'Octobre. Cela est influencé par le facteur de tarissement qui se trouve relativement plus élevé.

Un volume total de **6 309 000m³** est à mobiliser pour boucler deux campagnes de riz pendant la contre saison.

Tableau 8 : Comparaison entre le volume prélevé et les besoins en eau des plantes

Volume estimé sur la base des prélèvements	Volume estimé sur la base des besoins en eau
6 466 521m ³	6 309 000m ³

La comparaison des deux volumes estimés par les deux méthodes (Tableau 8) que sont le volume d'eau prélevée et les besoins en eau brute des cultures laisse voir une différence de 157 521 m³ soit une perte de 2.5 %. Cela est dû au fait que les producteurs surestiment les besoins en eau des plantes.

IV.3 EVALUATION DE LA QUANTITE D'EAU SOUTERRAINE MOBILISABLE

IV.3.1 Caractérisation de la fluctuation piézométrique

Compte tenu de nombreuses lacunes dans les données nous avons fait l'analyse sur quatre piézomètres suivant deux années. Les données varient en fonction des piézomètres mais une tendance commune se présente en période de basses eaux et de hautes eaux qui se situent respectivement entre Septembre -Avril pour les basses eaux et Avril- Septembre pour les hautes eaux.

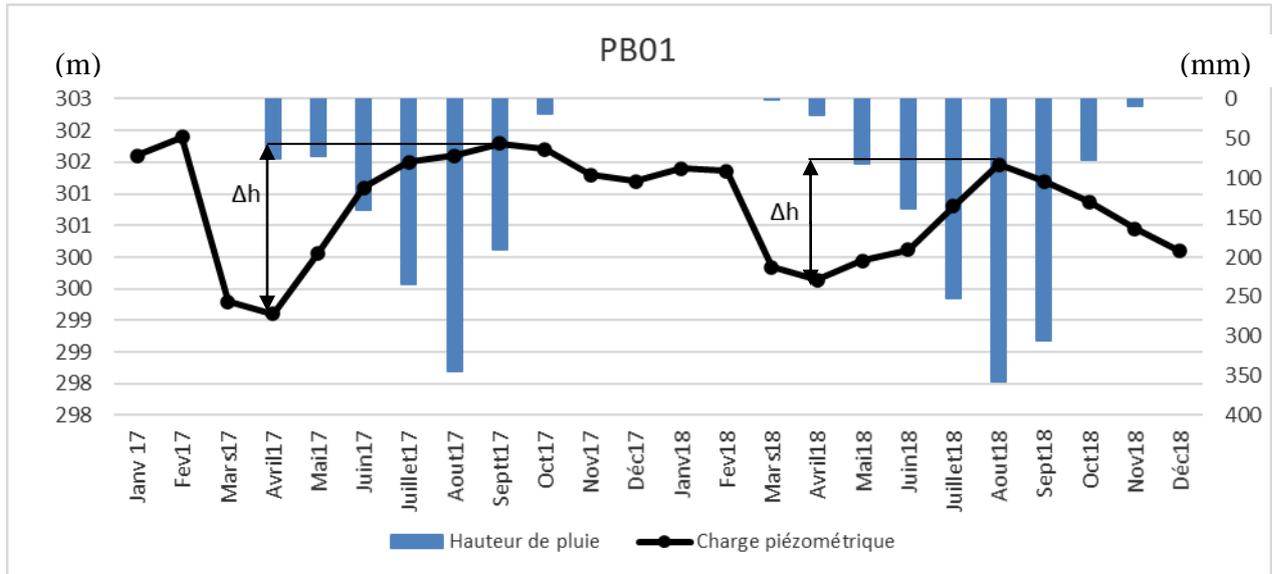


Figure 8 : Variation temporelle du piézomètre PB01

L'analyse de la figure 8 nous révèle que :

- En 2017 la remontée de la nappe commence dès les premières pluies en Avril jusqu'à atteindre son maximum en Septembre pour ensuite descendre progressivement. La réaction de la nappe est instantanée et la variation de la charge atteint de 2,8 m en considérant les niveaux minimum et maximum.
- En 2018, la décharge continue jusqu'en Avril avant de passer à une recharge progressive à partir d'Avril jusqu'au mois d'Août ou elle atteint son maximum. La variation de la charge pour cette dernière année atteint 1,82 m en considérant les niveaux extrêmes.

L'analyse simultanée de l'évolution de la piézométrie et des précipitations révèle que la charge piézométrique varie en fonction de la pluviométrie.

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

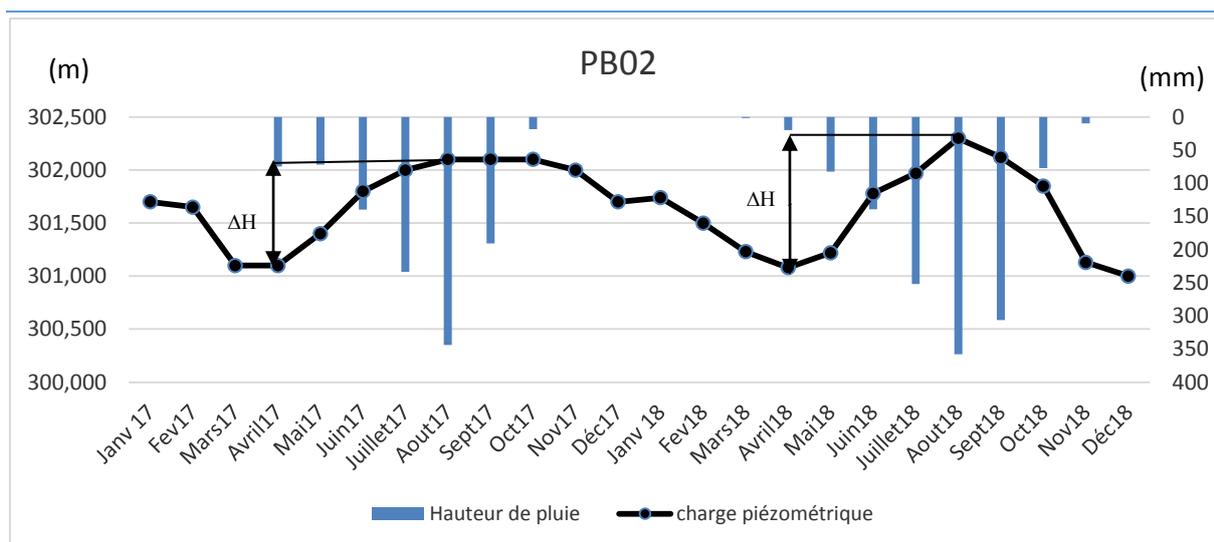


Figure 9 : Variation temporelle du piézomètre PB02

L'analyse de la figure 9 révèle que :

- En 2017, la remontée de la nappe commence à partir du mois d'avril ou nous observons les premières pluies pour atteindre son maximum en Août et par la suite connaître une baisse progressive. La variation du niveau piézométrique atteint 1 m en considérant les niveaux extrêmes.
- En 2018, la décharge continue jusqu'en Avril avant de commencer à remonter avec les premières pluies pour atteindre son maximum en Août. La variation du niveau piézométrique atteint 1,22 m en considérant les niveaux extrêmes.

L'analyse simultanée de l'évolution de la piézométrie et des précipitations tout au long des deux années révèle que la charge piézométrique varie en fonction de la pluviométrie.

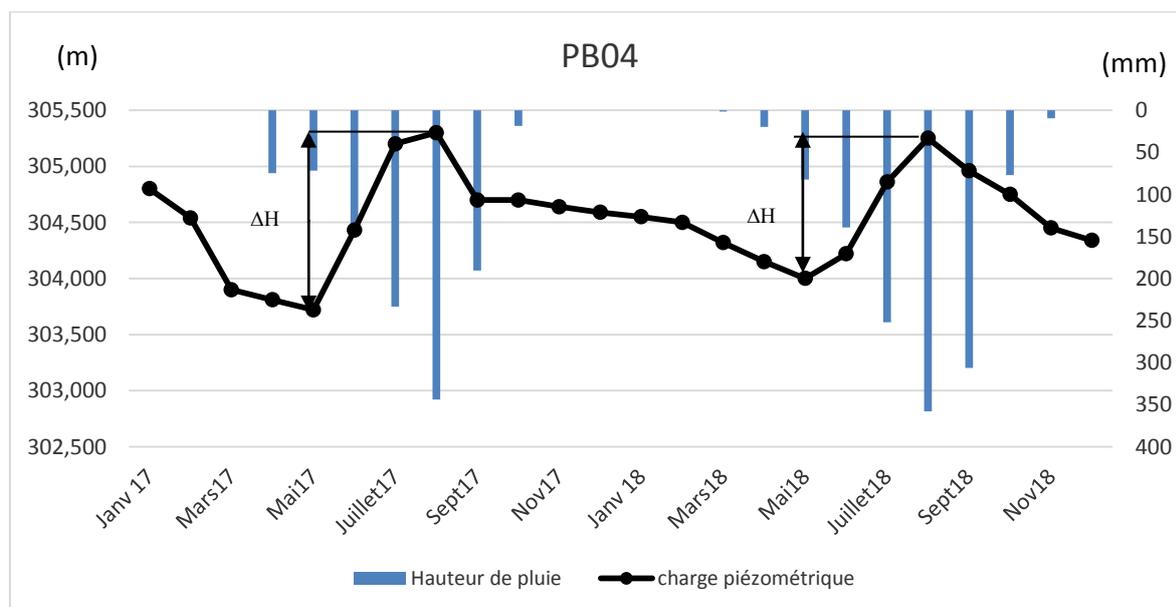


Figure 10 : Variation temporelle du piézomètre PB04

L'analyse de la figure 12 révèle que :

- En 2017, la réaction de la nappe n'est pas instantanée car il n'y a pas de remontée dès les premières pluies. On remarque que les premières pluies sont observées à partir du mois d'Avril alors que la courbe décroît légèrement au mois de Mai avant l'observation d'une remontée. Cela peut être dû à un pompage excessif pendant le mois d'Avril ou une mauvaise lecture du niveau piézométrique. Donc la remontée du niveau commence à partir du Mois de Mai pour atteindre son maximum au mois d'Août et par la suite décroître progressivement. La variation du niveau piézométrique atteint 1,58 m en considérant les niveaux extrêmes.
- En 2018 la décharge continue progressivement jusqu'au mois de Mai avant de remonter jusqu'à atteindre son maximum en Août. Le même phénomène est observé pour l'année 2018. La recharge n'est pas instantanée dès les premières pluies. La variation du niveau piézométrique atteint 1,24m en considérant les valeurs extrêmes.

L'analyse simultanée de la piézométrie et des précipitations durant les deux années consécutives sur le piézomètre PB04 révèle une corrélation entre ces deux paramètres avec un léger décalage pour les mois d'Avril ou la réponse n'est pas instantanée.

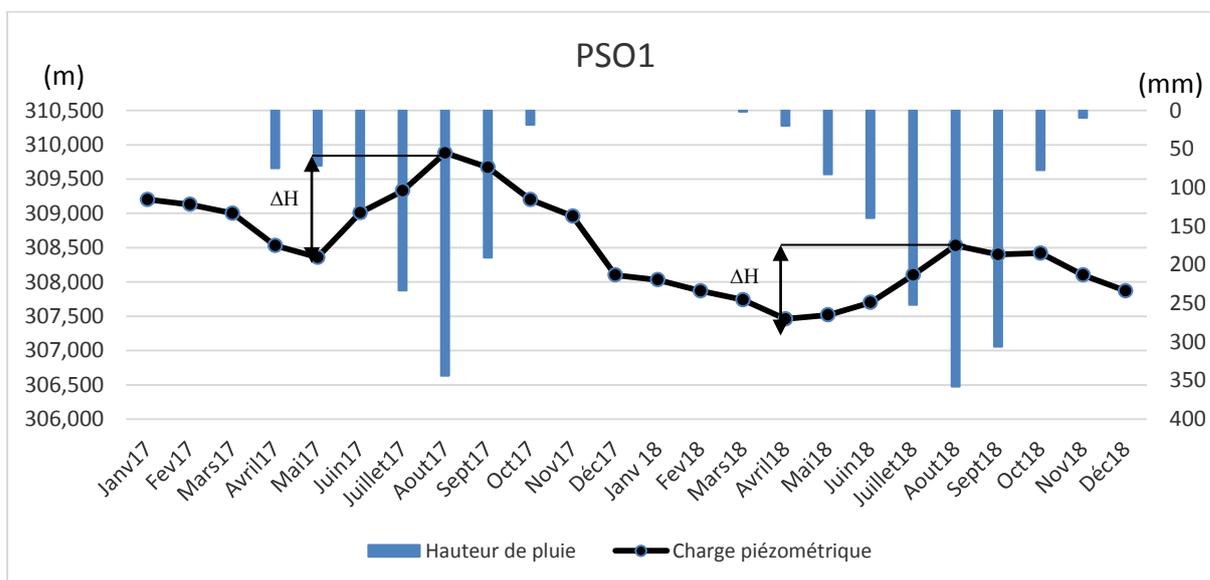


Figure 11 : Variation temporelle du piézomètre PS01

L'analyse de la figure 11 révèle que :

- En 2017 la recharge commence au mois de Mai, la réponse à la pluie n'est donc pas instantanée. Elle croît progressivement par la suite jusqu'au mois d'Août où l'on observe les plus grandes précipitations. On observe par la suite une baisse progressive

du niveau piézométrique. En considérant les valeurs extrêmes on atteint une variation du niveau piézométrique de 1, 52 m.

- En 2018, on remarque une décharge progressive jusqu'en Avril suivi d'une recharge le même mois les premières pluies pour atteindre son maximum au mois d'Août et par la suite décroître. La variation de la piézométrie atteint 1,07 m en considérant les valeurs extrêmes.

Remarque : une tendance commune aux différentes variations est que la courbe monte progressivement en fonction de évènement pluvieux jusqu'à atteindre son maximum en aout ou l'on observe le plus de précipitation puis commence à décroître en septembre malgré les évènements pluvieux. Cela s'explique par le fait que l'intensité de la pluie commence à décroître mais aussi aux différents prélèvements qui connaissent une légère hausse en ces périodes. La recharge est donc sensible à la pluviométrie.

Les résultats de l'estimation de la recharge par la méthode de la fluctuation piézométrique sont consignés dans le tableau suivant (Tableau 9) :

Tableau 9: Variation de stock d'eau par la méthode de la fluctuation piézométrique

Année	Ouvrage	Δh (m)	S_y	ΔS (mm)
2017	PB01	2.80	0.05	140
	PB02	1.00	0.05	50
	PB04	1.58	0.05	79
	PS01	1.52	0.05	76
2018	PB01	1.82	0.05	91
	PB02	1.22	0.05	61
	PB04	1.25	0.05	62.5
	PS01	1.07	0.05	53.5

Les valeurs de la recharge calculée en 2017 varient entre 76 et 140 mm tandis qu'en 2018 elle varie entre 53.5 et 91 mm en fonction des quatre piézomètres.

A l'échelle du bassin versant qui une superficie de 91 036 Km² on a une valeur de stock d'eau renouvelé de 6 975 633 500 m³ d'eau

Les chroniques piézométriques n'étant pas suffisamment longues et les piézomètres n'étant pas distribués de façon représentative nous avons aussi abordé la question de la recharge par méthode du bilan de thorthwaite.

IV.3.2 Estimation de la recharge par la méthode du bilan de thorthwaite

Les résultats du calcul des différents paramètres de Thornthwaite sont résumés dans le tableau

10.

Le bilan hydrologique est ici marqué par la prédominance de l'évapotranspiration sur les autres paramètres. Elle représente 72% de la pluie tombée. Ce qui contribue à diminuer la part d'eau disponible pour les écoulements et la recharge.

La hauteur de pluie annuelle de l'année considérée s'élève à 950,8 mm tandis que celles de l'ETR et du ruissellement s'élèvent respectivement à 685.63mm et 95.08mm. Ces valeurs soustraites de la hauteur de pluie annuelle nous donnent une hauteur d'eau infiltrée de **170.09mm/an** soit un ratio recharge/pluie de 17%.

Tableau 10: Valeurs des paramètres de Thornthwaite

	ETP	P	RFU	ETR	Cr	R
Janv.	51,72	0	0	0	0,1	0
Fév.	65,78	0	0	0	0,1	0
Mars	131,66	1,5	0	1,5	0,1	0,15
Avril	152,46	19,8	0	19,8	0,1	1,98
Mai	179,96	82,5	0	82,5	0,1	8,25
Juin	166,00	39,3	0	39,3	0,1	3,93
Juillet	158,39	209	50,61	158,39	0,1	20,9
Aout	150,64	257,9	107,26	150,64	0,1	25,79
Sept	146,80	254,1	107,30	146,80	0,1	25,41
Oct	149,49	77,2	0	77,2	0,1	7,72
Nov	132,15	9,5	0	9,5	0,1	0,95
Dec	123,78	0	0	0	0,1	0
Total		950,80		685,63		95,08

IV.3.3 Discussion sur la productivité de la nappe

Les termes du bilan se présentent comme suit :

$$P (950 \text{ mm}) = \text{ETR} (685 \text{ mm}) + R (95 \text{ mm}) + I (170 \text{ mm})$$

$$P (100 \%) = \text{ETR} (72 \%) + R (11\%) + I (17\%)$$

L'infiltration représente environ 17% de la pluie tombée

Des études antérieures ont prouvé que la valeur de recharge était de :

- 127 mm en moyenne de 1991 à 1990 (*Dakoure, 2003*)
- 105 mm en 2009 (*Sauret, 2013*)

- 123 mm en moyenne de 1961 et 2014 (*Tirogo, 2016*)

La différence de la valeur calculée entre 2017 et 2018 des années antérieures peut s'expliquer de plusieurs manières : l'augmentation de la pluviométrie ces deux dernières années et aussi les nouvelles techniques de conservation des sols utilisées par les producteurs favorisant l'infiltration de l'eau.

IV.4 TECHNOLOGIE DU TUBEWELL

IV.4.1 Choix du site

Les différentes investigations et recherches bibliographiques nous ont permis de conclure sur la présence d'une nappe phréatique à moins de 5m sur la zone d'étude. En effet sur le site du périmètre de Bama nous avons pu énumérer les infrastructures hydrauliques suivantes :

- Une cinquantaine de petits puits de moins 2m de profondeur.
- Une vingtaine de puits à grands diamètres avec des profondeurs situées entre 3 et 4 m.

Afin d'être en phase avec les conditions d'installation d'un tubewell à usage agricole nous avons mené une seconde investigation pour vérifier la proximité avec les décharges toxiques ou les infrastructures hydrauliques de même envergure.

Toutes ces conditions étant réunies nous sommes passés aux choix des différents sites qui se sont portés sur les coordonnées suivantes :

Tableau 11 : Coordonnées des tubewell

	Propriétaire de la parcelle	Profondeur	X	Y
Tubewell 1	Bakary	6m	346672	1259442
Tubewell 2	Salif	10m	345632	1259986

Le forage des différents tubewell en passant par le prélèvement des cutting nous a permis de représenter les figures 12 et 13.

La description in situ des cutting du tubewell 1 de la figure 12 a permis d'identifier la nature du sol à différentes profondeurs :

- De 0 à 0.5 m nous observons un sol du type sable rougeâtre plus du limon.
- De 0.5 à 2 m de profondeur nous rencontrons toujours du sable rougeâtre plus limon brun clair
- De 2 à 4 m de profondeur nous rencontrons du sable plus ou moins rougeâtre et du limon brun foncé

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

- De 4 à 6 m nous rencontrons en plus sable et du limon quelques morceaux de grès altérés.

La description in situ des cutting du tubewell 2 de la figure 13 a permis d'identifier la nature du sol à différentes profondeurs :

- De 0 à 0.5 m nous observons un sol du type sable rougeâtre plus du limon.
- De 0.5 à 2 m de profondeur nous rencontrons toujours du sable rougeâtre plus limon brun clair
- De 2 à 4 m de profondeur nous rencontrons du sable plus ou moins rougeâtre et du limon brun foncé
- De 4 à 10 m nous rencontrons en plus sable et du limon quelque morceaux de grès altéré.

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

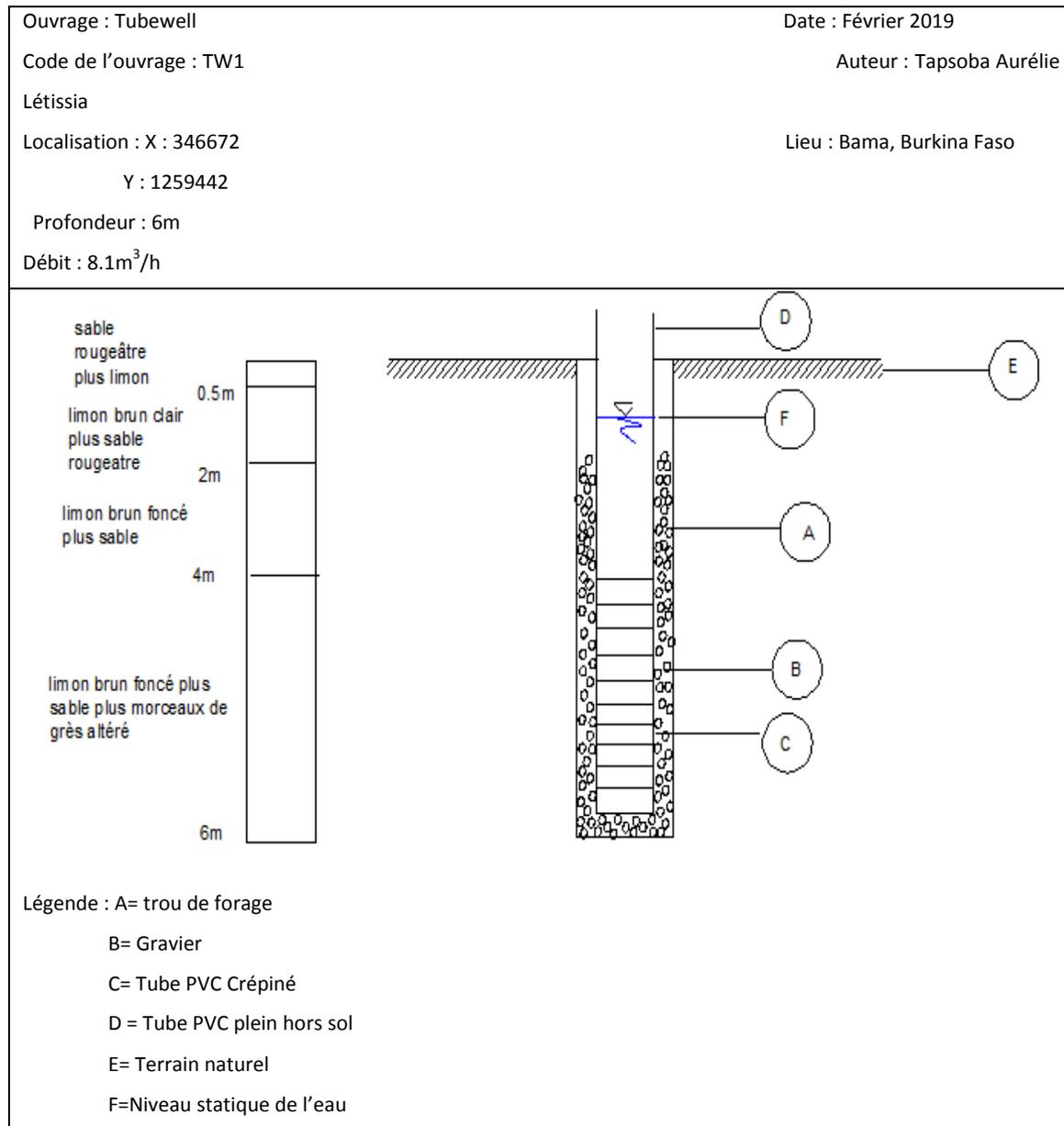


Figure 12 : Tubewell 1

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

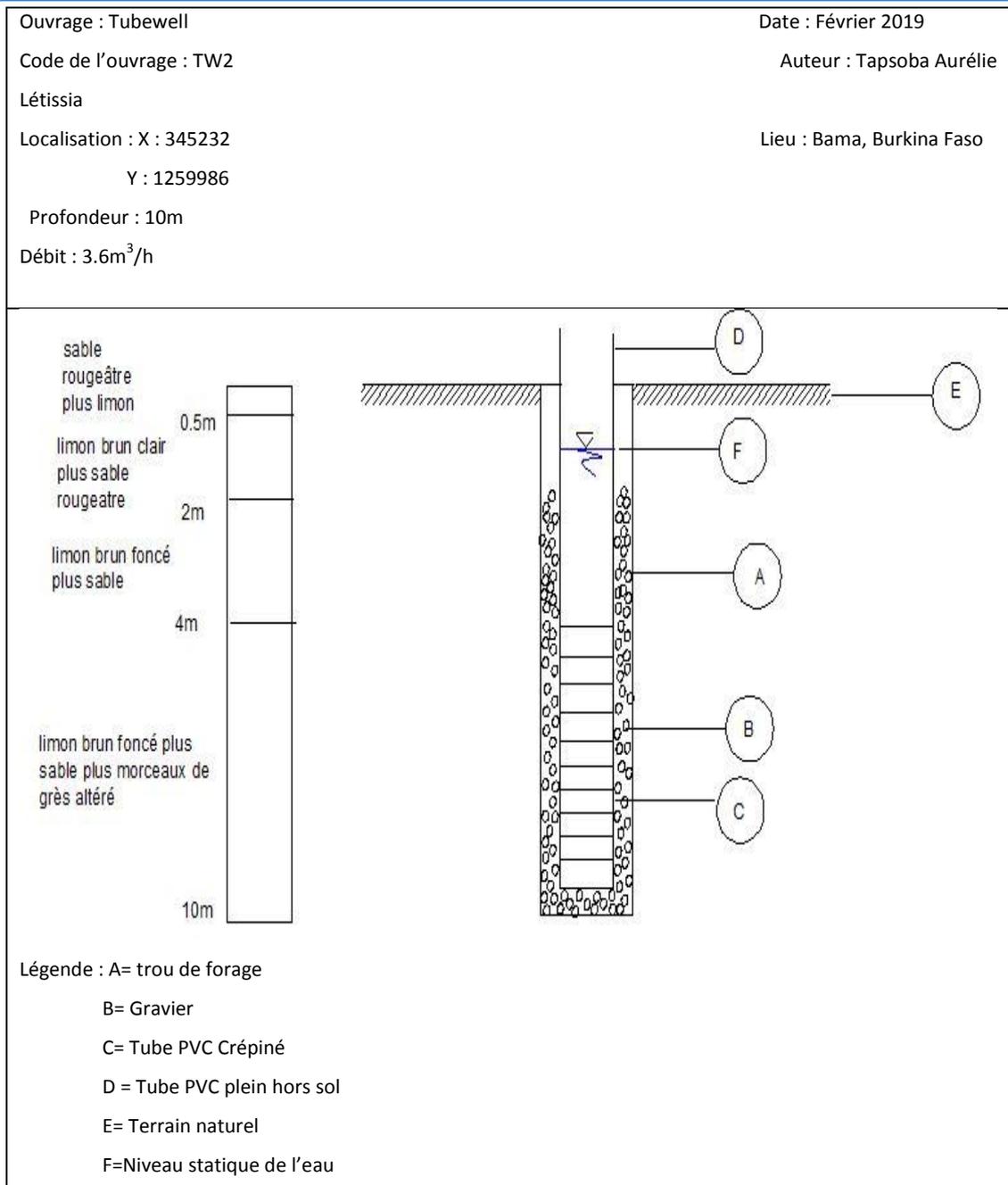


Figure 13 : Tubewell 2

La description de la texture du sol provenant du forage de ces deux tubewell concorde avec les résultats de l'analyse du sol faite par la méthode du double anneau de Muntz à l'issue duquel nous avons conclu sur la nature du sol au niveau du périmètre de Bama qui est de type sableux-limoneux.

Chaque tubewell est équipé d'un tube en PVC crépiné du bas vers le haut sur la moitié de sa longueur afin de capter le maximum des venues d'eau. Il est par la suite protégé par un massif filtrant composé de gravier plus ou moins grossier afin d'éviter le colmatage des fentes. Le

massif est introduit dans l'annuaire entre le tubage et le trou de forage jusqu'à hauteur des crépines.

Afin de faciliter le raccordement du tubewell au reste de l'installation d'irrigation, une partie du tubage PVC est laissé hors sol.

IV.4.2 Suivi du dispositif

IV.4.2.1 Débits

Les valeurs de débits mesurés, le temps de pompage et les surfaces irriguées de chaque tubewell sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12 : Débits

	Débits (m³/h)	Temps de pompage	Surface irriguée
Tubewell 1	8.1	2h	0.25ha
Tubewell 2	3.6	4h	0.25ha

Les tubewells installés dans les parcelles des deux producteurs ont servi à l'irrigation expérimentale. Ces tubewells ont assuré l'irrigation durant toute une campagne de riz.

Chaque tubewell peut être utilisé pour l'irrigation de 1 ha et l'essai sur les 0.25 ha nous a permis par extrapolation d'estimer le rendement à 6t/ha pour la méthode du AWD et 5t/ha pour la méthode paysanne.

L'utilisation combinée de la technologie du tubewell et de la méthode d'irrigation AWD permet donc de hausser le rendement de 50% puisque qu'il passerait de 4t/ha à 6t/ha.

Il faut noter que les débits présentés ici sont les débits mesurés des pompes. Pour une meilleure approche de la capacité de l'ouvrage il faudrait rapporter le débit au rabattement.

IV.4.2.2 Mesures périodiques

Les mesures ont été prises chaque trois (03) jour entre le 01/04/2019 et le 21/06/2019. Nous avons pris au total vingt (20) mesures au niveau de chaque piézomètre. Ce qui nous a permis de tracer les graphiques suivants (Figures 14, 15, 16 et 17. (Voir annexe C)

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »



Figure 14 : Fluctuation de la nappe piézomètre 1



Figure 15 : Fluctuation de la nappe piézomètre 2

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

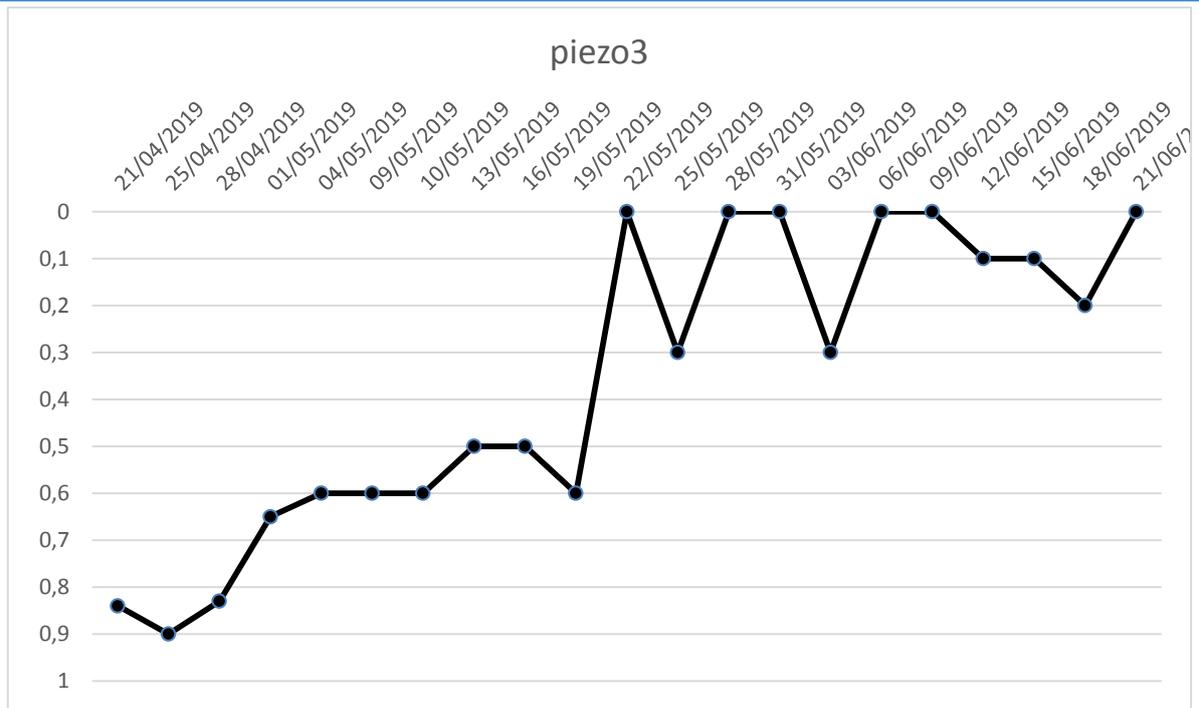


Figure 16 : Fluctuation de la nappe piézomètre 3

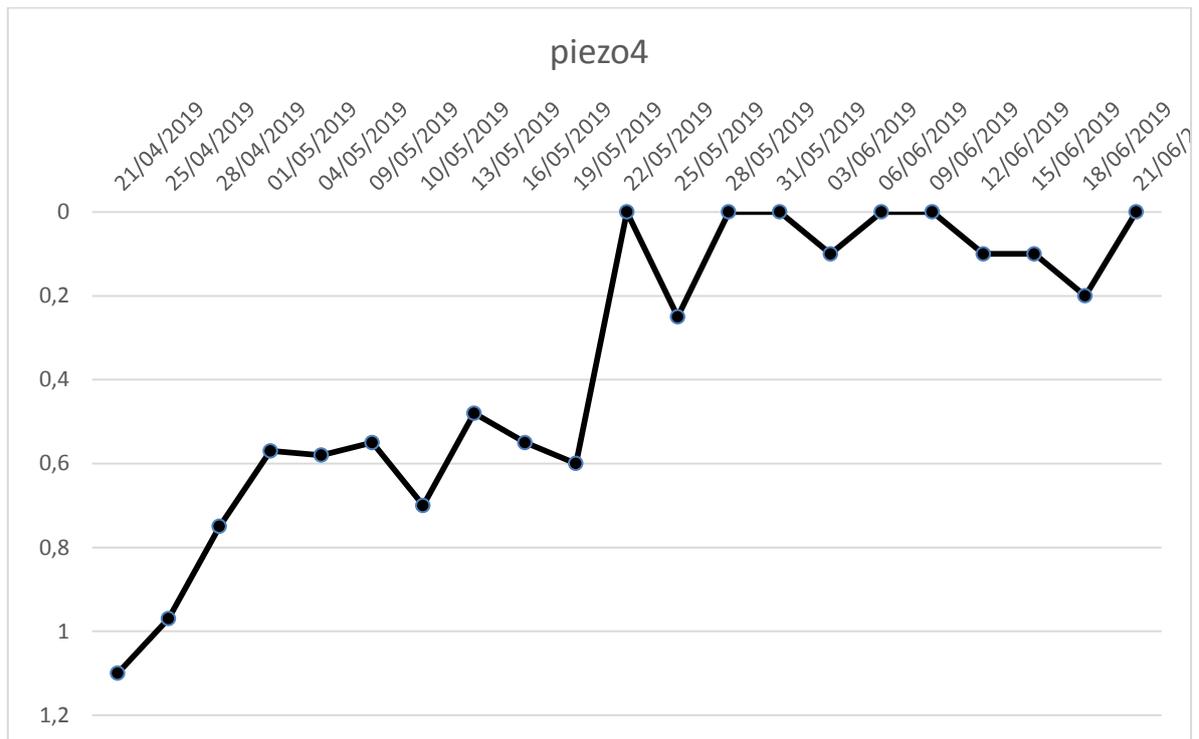


Figure 17 : Fluctuation de la nappe piézomètre 4

Les graphiques 1, 2, 3 et 4 représentent respectivement la fluctuation de la nappe au niveau des piézomètres 1, 2, 3 et 4. Les quatre graphiques en forme de dents de scies montrent une fluctuation variée dans ces piézomètres. En effet ils ont presque les mêmes allures et présentent des pics jusqu'à atteindre le niveau du terrain naturel à certains endroits. Ces hausses indiquent une recharge ponctuelle de la zone et coïncident avec les jours de pluies. On peut donc dire que la pluie influence la recharge de la zone.

- Pour le piézomètre 1 le niveau de l'eau le plus bas est de 1.5 m et le niveau le plus haut est de 0 m, le terrain naturel. Ce qui donne une variation de charge piézométrique de 1.5 m. Dès les premières mesures on remarque une remontée progressive du niveau statique de l'eau alors qu'il n'y a aucun apport d'eau en termes de précipitations. Nous pouvons donc dire qu'une partie de la recharge se fait soit horizontalement soit par retour d'irrigation. A la 11^{ème} mesure, le niveau de l'eau atteint le terrain naturel suite à une pluie. Les piézomètres étant protégés par le haut il s'agit donc d'une recharge directe et instantanée par infiltration. Par la suite l'eau descend 3 jours après jusqu'à 0.4m. Cela est dû au pompage effectué pour l'irrigation. La même opération se répète à partir des 11^{ème}, 13^{ème}, 14^{ème}, 16^{ème}, 17^{ème} et 21^{ème} mesures où nous observons encore une remontée du niveau statique jusqu'au terrain naturel due à l'infiltration de l'eau de pluie suivit d'une baisse du niveau influencé par le pompage.
- Les piézomètres 2,3 et 4 présentent les mêmes fluctuations que le piézomètre 1. Nous remarquons une montée rapide du niveau statique juste après chaque pluie et par la suite nous remarquons une baisse considérable de ce niveau due aux différents pompages.

La recharge sur le site de Bama peut donc se faire par plusieurs méthodes :

- De façon instantanée par infiltration
- Par retour d'irrigation
- Par recharge horizontale.

En effet cela s'explique aussi par la nature du sol qui présente une conductivité hydraulique assez élevée ce qui facilite l'infiltration rapide de l'eau dans le sous-sol et aussi les transferts d'eau horizontaux contribuant ainsi à la recharge de la nappe phréatique.

CONCLUSION- PERSPECTIVES

La présente étude portant sur l'étude de la disponibilité en eau souterraine à but agricole est passée par la prise en compte de plusieurs aspects à savoir l'évaluation des besoins en eau de culture, l'évaluation de la ressource en eau souterraine mobilisable et la proposition d'une technologie d'exploitation qu'est le tubewell. Elle nous a permis de tirer des résultats.

La comparaison des prélèvements agricoles et des besoins en eau montre une légère surexploitation de 7.3% de la part des producteurs. La caractérisation du sol par la méthode du double anneau a révélé que la majeure partie du sol du périmètre de Bama est de nature Sablo-Limoneux.

En ce qui concerne la piézométrie nous remarquons que la recharge se situe généralement au tour des mois de Juin à Octobre qui correspondent aux mois de plus hautes pluviométries. La recharge calculée par la méthode de Thornthwaite a donné une valeur de **170 mm/ an**. Cette valeur comparée aux sollicitations de la ressource en eau nous permet de donner une conclusion favorable en ce qui concerne la capacité de la nappe à satisfaire les besoins en eaux agricoles pendant la contre saison pour le périmètre de Bama.

La recharge de la nappe sur le site de Bama se fait essentiellement par infiltration, la pérennité de celle-ci repose en partie sur l'abondance de la pluviométrie

L'expérimentation de la technologie du tubewell fait sur le terrain a montré que cette dernière est capable d'assurer l'irrigation de toute la contre saison pour minimum un hectare par tubewell avec des rendements pouvant aller jusqu'à **6t/ha**. Nous pouvons donc avoir recours à cette technologie pour une exploitation efficiente de la ressource souterraine.

En définitive les producteurs de la plaine de Bama peuvent considérer la ressource en eau souterraine comme une alternative aux nombreux problèmes d'eau qu'elle rencontre pendant la contre saison tout en utilisant des outils qui vont leur permettre d'optimiser son utilisation.

Recommandations

Pour une meilleure exploitation de la ressource en eau souterraine à but agricole de Bama, il est important de mieux connaître la dynamique des eaux souterraines dans son bassin. Pour cela nous recommandons :

- Des investigations géophysiques afin de mieux connaître les différentes couches et leurs épaisseurs ;
- Des essais de pompages courte ou longue durée afin de déterminer les débits d'exploitation, leur pérennité ainsi que les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ;
- Des suivis piézométriques avant et après pompage pour une meilleure caractérisation piézométrique et appréciation de la réaction de l'aquifère ;
- Une analyse de l'eau afin de connaître la qualité de l'eau à utiliser pour l'irrigation
- Sensibiliser et former les producteurs sur des meilleures techniques de gestion de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Amadou Keita. (2018)** Cours d'Irrigation par aspersion 2iE.
- CommodAfrica (2018, mai 3).** Déficit céréalier au Burkina Faso en 2017/2018.
- Dao, Z. (2016).** La politique de la culture de maïs et de riz en campagne sèche: atouts et atterrissements au Burkina Faso (2001–2016). *Afrika Zamani*, (24), 129-148.
- Dakoure D. (2003).** *Etude Hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso-Mali)-Essai de modélisation*. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie. Thèse de doctorat, université Paris VI-Pierre et Marie Curie.
- Diallo, S., Nacro, H. B., & N'diaye, A. (2017).** Efficience des stratégies endogènes d'adaptation du secteur agricole aux changements climatiques dans le bassin de la région de Thiès (Sénégal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(2), 707-721.
- Dao D. (2015, Juillet).** Taux d'exploitation et durabilité de la ressource en eau des aquifères alluviaux du KOU et de KARFIGUELA. Master d'ingénierie, 2iE, Ouagadougou.
- Eli Serge Gaëtan SAURET . (2013, Juin).** *Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée*. Thèse de doctorat, Université de Liège; Fondation 2iE, BURKINA FASO.
- Koïta, M., Sandwidi, W. J. P., & Dara, A. E. (2017).** Recharge Estimation of Hard Rock Aquifers under Sahelian Climate Conditions Using Water Table Fluctuation: Case Study of Tougou Catchment, Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(12), 1428-1448.
- MCB-BF, AD9. (2017).** *Bilan de la production de la production céréalier du périmètre de Bama*.
- Nazoumou, Y., Favreau, G., Adamou, M. M., & Maïnassara, I. (2016).** La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger *Cahiers Agricultures*, 25(1), 15003.
- Organization, W. H. (2018).** *The state of food security and nutrition in the world 2018: building climate resilience for food security and nutrition*. Food & Agriculture Org.
- Sawadogo-Comparore, E. M., Temple, L., Ouédraogo, S., Zongo, A., & Soulama, S. (2020).** Renouveler la gouvernance du secteur semencier au Burkina Faso pour un développement inclusif.
- Serge Pieyns (2017, septembre).** Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux

au Burkina Faso.

Shah, T., Giordano, M., & Mukherji, A. (2012). Political economy of the energy-groundwater nexus in India: exploring issues and assessing policy options. *Hydrogeology Journal*, 20(5), 995-1006.

Tangara, B., Lidon, B., Dicko, M. K., Traoré, A. Z., & N'Diaye, K. (2017). Evolution des performances de l'irrigation en riziculture et extension des cultures de contre saison à l'Office du Niger. *Les Cahiers de l'Economie Rurale*, (24), 23-33.

Watto, M. A., Mugeru, A. W., Kingwell, R., & Saqab, M. M. (2018). Re-thinking the unimpeded tube-well growth under the depleting groundwater resources in the Punjab, Pakistan. *Hydrogeology Journal*, 26(7), 2411-2425.

Wellens, J., Nitcheu, M., Sawadogo, B., Mamadou, D., & Tychon, B. (2009). Optimisation des calendriers d'irrigation pour le périmètre irrigué de la Vallée du Kou à l'aide du logiciel SIMIS. *Journées Scientifiques 2iE; 2009*.

Yofe Tirogo, J. (2016). *Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso*. Paris 6. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie; Fondation 2iE.

Zoure, C. O., KOITA, M., Niang, D., Baba, I. I., Yonaba, O. R., Dara, A. E., ... Karambiri, H. (2019). Relationship between soil water content and crop yield under sahelian climate conditions: case study of Tougou experimental site in Burkina Faso.

ANNEXES

Annexe A: Tableau de suivi des prélèvements	II
Annexe B: Caractéristiques du sol	III
Annexe C: Calcul de ET0 par la formule de Penmam modifiée	IV
Annexe D : Calcul de ET0 par la formule de Blaney et Criddle.....	V
Annexe E: Calcul de ET0 par la formule de Thornthwaite	VI
Annexe F: Calcul de la capacité de stockage équivalent du bassin du kou.....	VII
Annexe G : Suivi piézométrique	VIII
Annexe H: Fiche d'enquête	IX

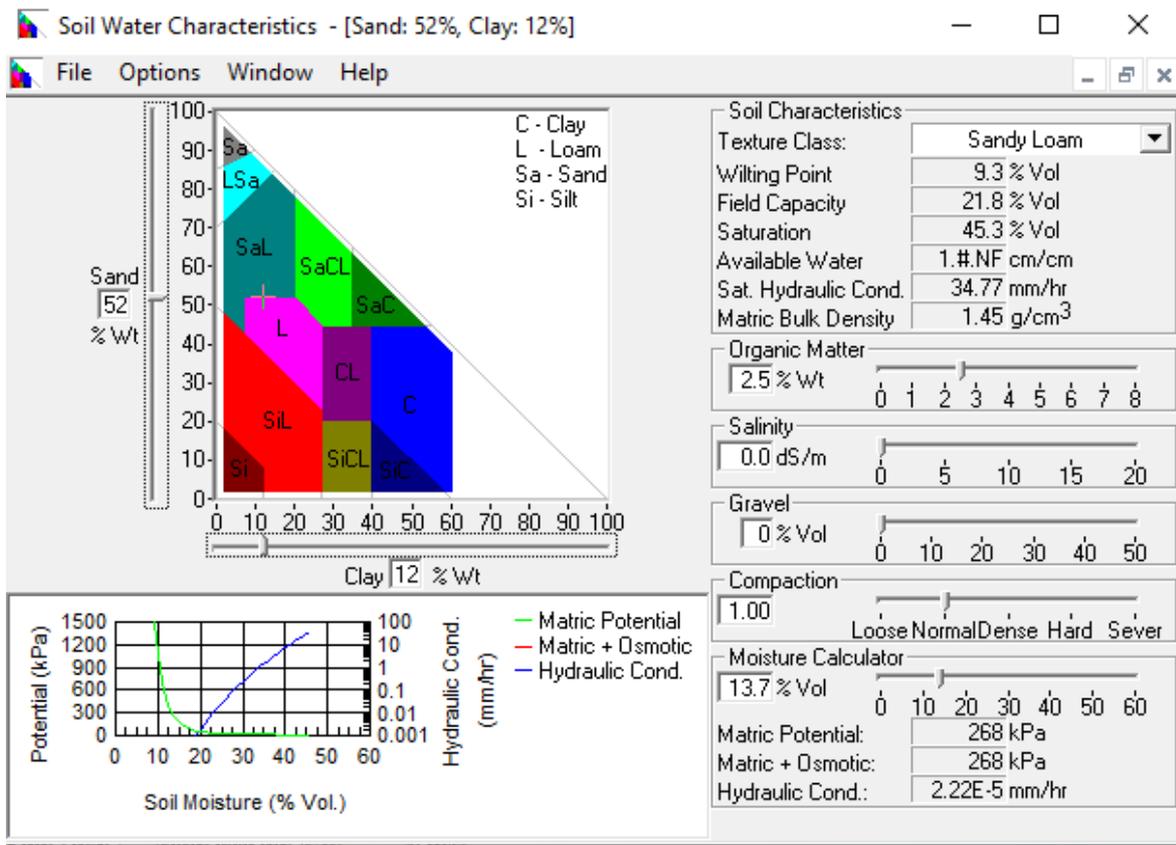
« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Annexe A: Tableau de suivi des prélèvements

Numéro du producteurs	Nombre d'heures de pompage	Nombre de jours d'irrigation par semaine	Débit de la pompe(m3/h)	Surface irriguée(ha)	Volume d'eau prélevé par semaire
1	3	2	36	1	216
2	4	2	36	1	288
3	3	3	36	1	324
4	3	3	36	1	324
5	3	2	36	1	216
6	4	2	36	1	288
7	3	3	36	1	324
8	3	2	36	1	216
9	3	3	36	1	324
10	4	2	36	1	288
11	3	3	36	1	324
12	3	3	36	1	324
13	3	3	36	1	324
14	3	3	36	1	324
15	3	2	36	1	216
16	3	2	36	1	216
17	3	3	36	1	324
18	4	2	36	1	288
19	3	3	36	1	324
20	3	3	36	1	324
21	4	2	36	1	288
22	4	2	36	1	288
23	3	2	36	1	216
24	3	3	36	1	324
25	3	2	36	1	216
volume d'eau prélevé par semaine par hectare					285.12
volume d'eau par saison sèche					7698.24

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Annexe B: Caractéristiques du sol



« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Annexe C: Calcul de ET0 par la formule de Penman modifiée

Mois	Nbre de jr/mois	Tmin	Tmax	Humidité relative	Vitesse du vent (m/s)	vitesse du vent (km/jr)	Insolation moyenne	Insolation mensuelle	ET0 (mm/jr)	ET0 (mm)
Janvier	31	12,3	34,0	51%	2,8	241,9	8,413	260,80	5,71	177,01
Février	28	19,2	36,3	51%	3,1	269,3	9,602	268,85	6,77	189,56
Mars	31	22,2	38,6	51%	3,0	258,9	8,558	265,28	7,2	223,2
Avril	30	25,2	38,1	57%	3,1	265,0	7,547	226,40	6,91	207,3
Mai	31	25,3	36,2	65%	2,8	239,8	7,567	234,59	6,1	189,1
Juin	30	23,6	33,6	72%	3	259,2	7,063	211,90	5,35	160,5
Juillet	31	23,2	31,6	80%	2,5	212,1	6,633	205,63	4,49	139,19
Aout	31	22,8	30,5	83%	2,6	226,2	6,102	189,16	4,18	129,58
Septembre	30	23,1	31,0	85%	2,1	184,3	6,790	203,70	4,19	125,7
Octobre	31	22,9	33,6	78%	1,9	163,6	7,239	224,40	4,52	140,12
Novembre	30	18,6	35,3	67%	1,9	161,3	8,807	264,20	5,05	151,5
Décembre	31	12,6	33,5	56%	2,4	206,1	8,815	273,27	5,26	163,06

Annexe D : Calcul de ET0 par la formule de Blaney et Criddle

Mois	température moyenne	H	ET0 Blaney et Criddle
Janvier	23,2	276,9	95,50
Février	24,9	232,6	83,54
Mars	29,5	251,4	100,01
Avril	30,1	220,3	88,75
Mai	30,7	231,3	94,34
Juin	29,1	241,3	95,18
Juillet	27,5	206,9	78,83
Aout	26,6	187,7	70,09
Septembre	27,1	188,5	71,19
Octobre	28,2	224,4	86,82
Novembre	27	264,2	99,55
Décembre	23	272,9	93,66

« Evaluation de la disponibilité en eau souterraine à but agricole :
Cas de Bama au Burkina Faso »

Annexe E: Calcul de ET0 par la formule de Thornthwaite

Mois	Tm	im	l	a	F(lamda)	ET0 Thornthwaite
Janvier	23.2	10.21	156.75	3.01	0.994	51.72
Février	24.9	11.37	156.75	3.01	0.91	58.58
Mars	29.5	14.69	156.75	3.01	1.03	110.40
Avril	30.1	15.15	156.75	3.01	1.032	117.52
Mai	30.7	15.61	156.75	3.01	1.086	131.24
Juin	29.1	14.39	156.75	3.01	1.064	109.46
Juillet	27.5	13.21	156.75	3.01	1.088	94.42
Aout	26.6	12.56	156.75	3.01	1.072	84.17
Septembre	27.1	12.92	156.75	3.01	1.02	84.70
Octobre	28.2	13.72	156.75	3.01	1.018	95.28
Novembre	27.0	12.85	156.75	3.01	0.974	79.99
Décembre	23.0	10.08	156.75	3.01	0.978	49.58

Annexe F: Calcul de la capacité de stockage équivalent du bassin du kou

Classification pédologique		Reserve utile Rumax[mm]	CESI [mm]	Superficie Si [Km²]
Sols brunifiés	Sols bruns eutrophes ferruginisés (BEF)	70,5	141	6
	Sols bruns eutrophes tropicaux hydromorphes vertiques (BEHV)	78,87	159,7	
Sols à sesquioxides de fer et de manganèse	Sols ferrugineux tropical lessivé induré peu profond (FLI)	81,09	162,2	1019
	Sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion (FLC)	109,92	219,8	270
Sols ferralitiques	Sols ferralitiques faiblement désaturés remaniés modaux (FRM)	67,54	135,1	359
	Sols ferralitiques faiblement désaturés en (B) typique modal (FTM)	45,44	90,9	
Sols hydromorphes et ou Minéraux bruts	Sols hydromorphes peu humifères à pseudogley de surface (HPGS)	205	410	5
	Lithosols sur cuirasse (Lc)	30	60	23
	Grès à l'affleurement (Lith/grès)	51,06	102,1	8
	Lithosols sur roche (Lr)	20,5	41	155
CSEéq du bassin [mm]		150		

Annexe G : Suivi piézométrique

date	Niveau statique				commentaire
	piezo 1	piezo2	piezo3	piezo4	
21/04/2019	1.13	1.16	0.84	1.1	
25/04/2019	1.37	1.3	0.9	0.97	
28/04/2019	1.3	1.27	0.83	0.75	
01/05/2019	1.1	1.2	0.65	0.57	
04/05/2019	1.5	1.2	0.6	0.58	
09/05/2019	1.17	0.93	0.6	0.55	
10/05/2019	1.25	1.1	0.6	0.7	
13/05/2019	1.1	0.8	0.5	0.48	
16/05/2019	0.88	0.7	0.5	0.55	
19/05/2019	0.7	0.65	0.6	0.6	
22/05/2019	0	0	0	0	Pluie
25/05/2019	0.43	0.4	0.3	0.25	
28/05/2019	0	0	0	0	Pluie
31/05/2019	0	0	0	0	Pluie
03/06/2019	0.35	0.44	0.3	0.1	
06/06/2019	0	0	0	0	Pluie
09/06/2019	0	0	0	0	Pluie
12/06/2019	0.3	0.2	0.1	0.1	
15/06/2019	0.3	0.2	0.1	0.1	
18/06/2019	0.4	0.3	0.2	0.2	
21/06/2018	0	0	0	0	Pluie

Annexe H: Fiche d'enquête

FICHE D'ENQUETE

SITE :

DATE :

.....

SEXE :

Masculin

Féminin

Nom de l'enquêté :

1. Combien de fois (Fréquence) irriguez-vous vos champs par semaine ?

Réponse.....

2. Pendant combien de temps (heure) irriguez-vous vos champs ?

Réponse.....

3. Quel matériel utilisez-vous pour l'irrigation ?

Motopompe

Seau

Puisard

Autres

(à préciser).....

4. Avez-vous essayé d'utiliser les puits pour irriguer vos champs ?

OUI

NON

Si Non, pourquoi ? Réponse.....

Si oui, quel a été le résultat ? Réponse.....

)