REPUBLIQUE DU BENIN
=======
UNIVERSITE D'ABOMEY- CALAVI
=======
INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROGEOLOGIE
==========

VARIABILITE SAISONNIERE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET EVALUATION DE LA RECHARGE DES SYSTEMES AQUIFERES DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE KANDI

==========

Réalisé par :

AGBOTON Laurent Jéronardo Sourou

Sous la supervision de :

AVAHOUNLIN Ringo Fernand

Maître-Assistant/CAMES,
Enseignant Chercheur à l'UNSTIM

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

Année académique : 2021-2022

REPUBLIQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY- CALAVI

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROGEOLOGIE

VARIABILITE SAISONNIERE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET EVALUATION DE LA RECHARGE DES SYSTEMES AQUIFERES DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE KANDI

Réalisé par :

AGBOTON Laurent Jéronardo Sourou

Mention : Excellente

Jury :

Président : Prof. ALASSANE Abdoukarim

Membres : Dr. AVAHOUNLIN Ringo Fernand

Dr. SAMBIENOU Wèré Gédéon

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

Année académique : 2021-2022

Dédicace

Qu'il me soit permis de dédier, de tout cœur, ce travail scientifique à :

- mes parents, AGBOTON Théotime et AGBO Marie Berthe pour leur soutien et leur dévouement à mes côtés ;
- et mon adorable sœur, Mademoiselle AGBOTON Mariette Consuelo pour ses prières de tous les jours.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent à :

- **Dieu**, Créateur du Ciel et de la terre pour sa plénitude dans nos vies ;
- Professeur ALASSANE Abdoukarim, pour tous ces conseils prodigués durant ces trois années de formation et son aide à la réalisation de ce document ;
- mon maître de mémoire, Dr AVAHOUNLIN Ringo Fernand, qui malgré ses charges et ses différentes occupations, a accepté de nous appuyer dans la production de notre mémoire ;
- Dr KOUDERIN Lucie, responsable des stages au sein du cabinet HYDROGEOCLIM ;
- tout le personnel du cabinet HYDROGEOCLIM pour leur sens d'ouverture et de franchise à nous fournir les données ;
- Dr ADJAGODO Antoinette pour le soutien, qu'elle m'a apporté ;
- tous mes camarades de la Licence Professionnelle en Hydrologie promotion (2019-2020). Ces trois années passées ensemble dans l'harmonie, l'amour, la convivialité et l'apprentissage malgré nos différences, je ne suis pas prêt de les oublier. Avec vous, j'ai été transformé et changé en une nouvelle personne, je porte chacun de vous dans mon cœur ;
- tous mes amis ;
- tous les membres de ma famille qui sont toujours là pour moi ;
- mes oncles, tantes, cousins et cousines ;
- aux honorables membres du jury pour avoir accepté de donner leurs appréciations sur le travail en vue de son amélioration ;
- à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à ce travail.

Résumé

Le bassin sédimentaire de Kandi fait partie des quatre bassins de la république du Bénin et est situé entre 10°12' et 12°08' de latitude Nord et 2°45' et 3°46' de longitude Est. Il représente le bassin des Iullemmeden au Bénin et cette portion est estimée à environ 8700 km². L'objectif essentiel de ce travail est d'estimer la recharge des nappes de la zone de recherche. Ainsi, la méthode des fluctuations piézométriques et la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite ont été utilisées pour l'estimation de la recharge. Une collecte de données des niveaux piézométriques, des précipitations, et de l'évapotranspiration réelle de notre zone d'étude a été faite. Les données des niveaux piézométriques sont issues de six piézomètres installés dans le bassin et autour du bassin et de la station synoptique de Kandi. Les travaux de recherche ont révélé qu'au sein du bassin, au cours de la saison des pluies qui débute en avril et prend fin en octobre une baisse du niveau de la nappe est observée, tandis qu'au cours de la saison sèche qui débute en novembre et prend fin en mars, une augmentation du niveau de la nappe est observée. La remontée de la nappe est donc proportionnelle à la période de sécheresse et de ce fait, la recharge se fait en période de sécheresse, grâce aux eaux stagnantes et de ruissellement de la saison précédente qui s'infiltrent. Les résultats obtenus après l'application de la méthode des fluctuations piézométriques montrent que la lame d'eau au sein du bassin varie entre 4 mm et 77 mm par année avec une moyenne des précipitations estimée à environ 1106 mm sur dix ans (2010-2020). Ensuite, la méthode du bilan hydrique nous a permis de faire ressortir une valeur de la recharge qui est en moyenne de 742,6 mm/an sur cette même période. Ces résultats après analyse et comparaison avec ceux d'autres auteurs nous ont permis de déduire que les valeurs les plus fortes correspondent aux zones Sud et Ouest du bassin et que l'écoulement s'effectue du Sud au Nord.

Mots clés : Bassin sédimentaire de Kandi, Iullemmeden, Fluctuation piézométrique, Thornthwaite, Recharge.

Abstract

The Kandi sedimentary basin is one of the four basins of the Republic of Benin and is located between 10°12' and 12°08' North latitude and 2°45' and 3°46' East longitude. It represents the Iullemmeden basin in Benin and this portion is estimated at about 8700 km². The main objective of this work is to estimate the recharge of the aquifers in the research area. Thus, the piezometric fluctuation method and the Thornthwaite water balance method were used to estimate the recharge. Data collection of piezometric levels, precipitation, and actual evapotranspiration for our study area was done. The piezometric level data were obtained from six piezometers installed in and around the basin and from the synoptic station in Kandi. The research work revealed that within the basin, during the rainy season which starts in April and ends in October, a decrease in the water table level is observed, while during the dry season which starts in November and ends in March, an increase in the water table level is observed. The rise of the water table is therefore proportional to the dry period and thus, the recharge is done during the dry period, thanks to the stagnant water and runoff of the previous season that infiltrates. The results obtained after the application of the piezometric fluctuations method show that the water level within the basin varies between 4 mm and 77 mm per year with an average rainfall estimated at about 1106 mm over ten years (2010-2020). Then, the water balance method allowed us to highlight a recharge value that is on average 742.6 mm/year over the same period. These results after analysis and comparison with those of other authors have allowed us to deduce that the highest values correspond to the southern and western areas of the basin and that the flow is from south to north.

Key words: Kandi sedimentary basin, Iullemmeden, Piezometric fluctuation, Thornthwaite, Recharge.

Liste des sigles et abréviations

AEV	Adduction d'Eau Villageoise
BDI	Base de Données Intégrée
BF	Borne-Fontaine
BSK	Bassin Sédimentaire de Kandi
DDMEE	Direction Départementale des Mines de l'Energie et de l'Eau
DGEau	Direction Générale de l'Eau
EPE	Equivalent Point d'Eau
FCP	Forage Contre Puits
FPM	Forage équipé de Pompe à Motricité Humaine
IRB	Istituto Recerche Breda
MNT	Modèle Numérique de Terrain
N.S	Niveau Statique
PE	Point d'Eau
PM	Puits Moderne
PMH	Pompe à Motricité Humaine
RMP	Résonnance Magnétique des Protons
SIG	Système d'Informatique Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

Liste des tableaux

Tableau I: Situation des ponts d'eau par commune 6

Tableau II : Disposition et âges des formations du bassin de Kandi (Alidou, 1987 ; Seilacher et Alidou, 1988 ; Alidou et al., 1991). 11

Tableau III : Caractéristiques des piézomètres utilisés 20

Tableau IV : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P1 à Malanville 29

Tableau V : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P2 à Gogounou 29

Tableau VI : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P3 à Ségbana 30

Tableau VII : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P4 à Ségbana 30

Tableau VIII : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P5 à Kandi 31

Tableau IX : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P6 à Kandi 31

Tableau X : Lame d'eau (Leau) obtenue par commune 32

Tableau XI : Tableau récapitulatif du bilan estimé par la méthode de Thornthwaite de 2010 à 2020 32

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du Bassin Sédimentaire de Kandi 4
Figure 2 : Carte d'altitude du Bassin Sédimentaire de Kandi 9
Figure 3 : Carte pédologique du Bassin Sédimentaire de Kandi 10
Figure 4 : Carte géologique synthétique du bassin de Kandi (Konaté, 1996) 13
Figure 5 : Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Kandi (Konaté, 1996) 14
Figure 6 : Coupe géologique du bassin sédimentaire de Kandi (IRB 1989 in Achidi et al., 2012) 14
Figure 7 : Coupes hydrogéologiques du bassin sédimentaire de Kandi suivant la direction WNW-ESE et la direction SSW-NNE (Gbewezoun et al., 2021) 16
Figure 8 : Répartition des six piézomètres sur l'ensemble du bassin 19
Figure 9 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P1 à Malanville 23
Figure 10 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P2 à Gogounou 24
Figure 11 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P3 à Ségbana 25
Figure 12: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P4 à Ségbana 26
Figure 13: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P5 à Kandi 27
Figure 14: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P6 à Kandi 28
Figure 15: Evolution mensuelle de la pluie et de la recharge (2010 à 2020) 33

Sommaire

Dédicace i
Remerciements ii
Résumé iii
Abstract iv
Liste des sigles et abréviations v
Liste des tableaux vi
Liste des figures vii
Sommaire viii
Présentation de la structure d'accueil et activités menées ix
Introduction 1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE 3
1.1 Contexte géographique, humain, socio-économique et approvisionnement en eau potable. 3
1.2 Contexte hydrologique, hydroclimatique et végétation 7
1.3 Contextes géomorphologique et pédologique 8
1.4 Contexte géologique 10
1.5 Contexte hydrogéologique 15
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES 17
2.1 Matériels de travail 17
2.2 Méthodologie d'étude 17
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION 22
3.1 Résultats 22
3.2 Discussion 33
Conclusion et perspectives 36
Références bibliographiques 37
Annexes 42
Table des matières 51

Présentation de la structure d'accueil et activités menées

Dans le cadre de la rédaction de mon mémoire de fin de formation en Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau, j'ai eu à effectuer un stage au sein de la structure HYDROGEOCLIM Sarl. Cette structure est spécialisée dans les travaux d'ingénierie civile et géologique. Le déroulement de mon stage a porté principalement sur la partie documentation de mes travaux (recherches bibliographiques), les recherches proprement dites (collecte des données, traitement, analyse des résultats et discussion) et la rédaction du mémoire. Des travaux préliminaires ont été dès lors effectués pour combler les attentes de ce stage. Un suivi sur la manipulation de quelques outils de SIG tels que les logiciels Qgis et Arcgis a été effectué dans le but de renforcer les notions acquises en cours. Une sortie qui a duré plusieurs jours a été également organisée dans le but de nous familiariser avec les méthodes et les étapes de réalisation d'un forage en zone de socle en observant et en analysant un projet en cours. Tout cela nous a permis de nous rendre compte qu'une meilleure connaissance des ressources en eau est nécessaire. C'est ainsi que le présent thème a été initié dans le but d'apporter des informations nouvelles sur le bassin sédimentaire de Kandi.

Introduction

En Afrique de l'Ouest comme ailleurs, un élément essentiel de toute démarche de développement durable se trouve dans la maîtrise humaine des ressources en eau (Julien, 2006). Des ressources mondiales, l'Afrique dispose de 9% et la disponibilité ou la rareté de celles-ci sont tributaires des saisons ou de l'emplacement géographique. La multiplicité des bassins fluviaux transfrontaliers, présentant des caractéristiques diverses, constitue un véritable enjeu pour un partage et un développement équitable des ressources en eau entre les Etats riverains. On dénombre environ 60 bassins fluviaux transfrontaliers, couvrant environ 65% de la superficie du continent ainsi que 40 aquifères transfrontaliers. Les eaux souterraines sont considérées comme la source d'approvisionnement en eau potable pour 75% de la population en Afrique (Mazvimavi et Maathuis, Consulté en Août 2022).

En effet, les eaux souterraines constituent la majeure source d'approvisionnement en eau des populations du Bénin et de ce fait de la région de Kandi. Pour cela, la consommation d'une eau potable, facteur déterminant dans la prévention des maladies liées à l'eau, doit bénéficier d'une attention particulière (OBAMI-ONDON, 2020). Dans le but de préserver durablement cette ressource, la connaissance des processus qui contrôlent la recharge et les circulations souterraines est nécessaire (VIGUIER, 2016). Les principales réserves d'eau souterraine en Afrique et plus précisément au Bénin sont logées dans des aquifères sédimentaires qui sont généralement partagés par plusieurs pays. Pour un développement durable, ces eaux souterraines représentant une ressource essentielle et stratégique doivent permettre de répondre aux besoins des générations actuelles et à venir (Malundama, 2019). Cependant elles sont souvent très mal connues et de plus en plus menacées par : l'augmentation de la demande en eau, la variabilité climatique, la dégradation de leur qualité à cause de pollutions d'origines diverses et de l'appel d'eaux profondes parfois très minéralisées (Malundama, 2019). Si les bassins hydrographiques en Afrique ont fait l'objet depuis plusieurs années d'une attention particulière en matière de connaissance et de règles communes de gestion, il n'en est pas de même pour les systèmes aquifères. Il est donc important d'avoir une meilleure connaissance de ces systèmes aquifères. C'est dans cette optique que le présent thème intitulé : « **Variabilité saisonnière des niveaux piézométriques et évaluation de la recharge des systèmes aquifères du bassin sédimentaire de Kandi** » a été initié. Il a pour objectif général, d'estimer la recharge des systèmes aquifères du bassin sédimentaire de Kandi.

De façon spécifique, il s'agira de :

- étudier le comportement des nappes face au changement climatique ;
- analyser la variation des niveaux piézométriques et estimer la recharge des aquifères.

De part ces objectifs, il découle les hypothèses suivantes :

- la pluviométrie influence le niveau piézométrique ;
- le fleuve Niger constitue la zone de décharge des aquifères qui se retrouvent au niveau du bassin de Kandi

Ce mémoire comporte trois (3) chapitres.

- Le premier est consacré à la présentation de la zone d'étude ;
- La deuxième traite de la méthodologie mise en œuvre et du matériel utilisé ;
- Le troisième présente les résultats obtenus suivis de leurs analyses et discussions.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre est consacré à la présentation de notre milieu d'étude. Après avoir décrit brièvement la situation géographique, nous ferons un point sur la taille de la population et des sources d'approvisionnement. Par la suite, un bilan des cours d'eau, des différents sols, des différentes végétations et des différentes formations sera présenté.

1.1 Contexte géographique, humain, socio-économique et approvisionnement en eau potable.

- Contexte géographique

Le bassin sédimentaire de Kandi (BSK) est la portion béninoise du bassin de l'Iullemmeden (Achidi, et al., 2012). Dans l'extrême Nord-Est du Bénin, le bassin sédimentaire de Kandi se situe entre 10°12' et 12°08' de latitude Nord et 2°45' et 3°46' de longitude Est. Sa superficie d'environ 8700 km2 est modeste à l'échelle de l'ensemble du bassin, mais non négligeable à l'échelle du territoire béninois (114 763 km2) dont il représente environ 7,5%. La zone d'étude est limitée à l'Ouest par la faille de Kandi, au Nord par le fleuve Niger, au Sud par le socle cristallophyllien et à l'Est par le Nigéria (Achidi, et al., 2012). La Figure 1 ci-après indique la situation géographique de notre zone d'étude.

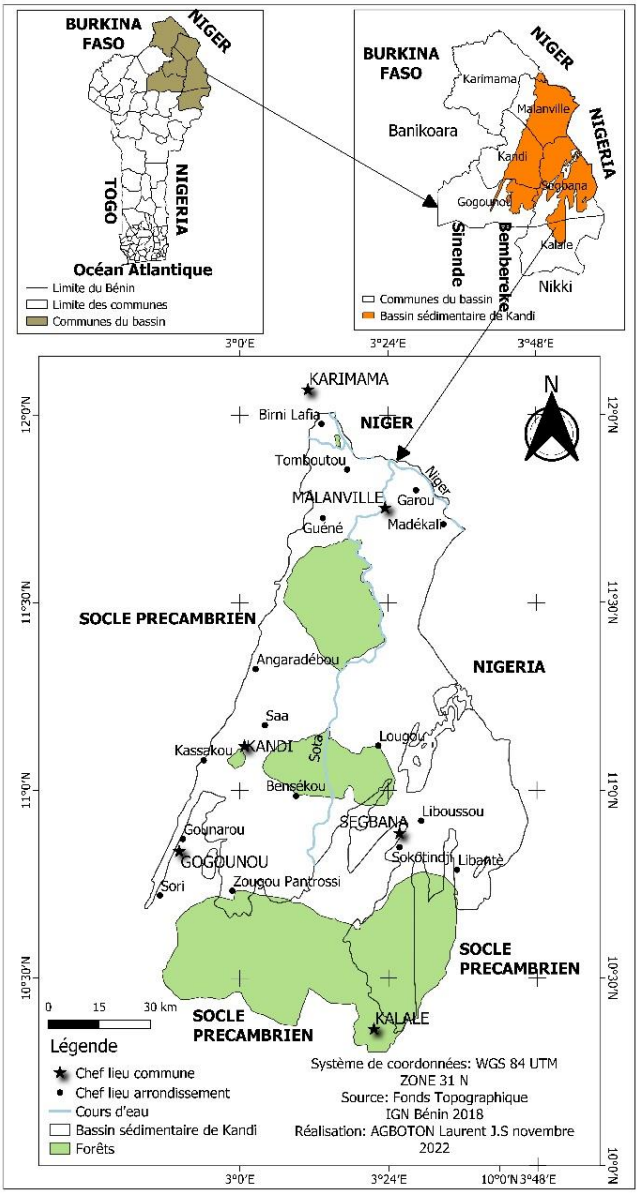


Figure 1 : Carte de localisation du Bassin Sédimentaire de Kandi

❖ Contexte humain et socio-économique

Les départements dans lesquels le bassin se retrouve sont l'Alibori et le Borgou**.** Il traverse six communes qui sont entre autres : Kandi, Malanville, Ségbana, Gogounou, Kalalé et Karimama. La population du BSK est estimée à environ 800 000 habitants en décembre 2018 (BDI / & DG-Eau/DDMEE, 2020) . Les peuplements et groupes ethniques sont : Dendi, Peulh, Boo, Mokollé, Yoruba, Haoussa, Bariba, Otamari, Yom, Lokpa, Fon, Djerma, Nagot, Mina, Goun, Kotocoli, Gourmantché et autres. Plusieurs activités y sont menées comme l'agriculture, l'élevage, la pêche, la chasse, l'artisanat et le commerce. L'économie est dominée par l'agriculture. Les cultures vivrières sont de type soudanais (sorgho, igname, maïs, arachide,

manioc) et les cultures industrielles développées sont le coton, le riz et les plantations d'anacardier (Alidou, 1983).

❖ Approvisionnement en eau potable

Les ouvrages d'approvisionnement en eau sont divers au niveau du BSK qui s'étend, entièrement ou partiellement, sur les six communes. Les différents ouvrages recensés dans chaque commune sont :

- ✓ Forage équipé de Pompe à Motricité Humaine (FPM) ;
- ✓ Forage Contre Puits (FCP) ;
- ✓ Puits Moderne (PM) ;
- ✓ Borne Fontaine (BF) ;

La situation des points d'eau par commune en 2018 se présente comme suit (Tableau I) :

Tableau I: Situation des ponts d'eau par commune

Commune	Population	Population desservie	Total EPE équipés	Total EPE Fonct	Taux de Panne (PM) non inclus	Taux de desserte	Nombre d'ouvrages fonctionnels par type				Nb total d'AEV	Nb EPE de BF/ Rampes en panne	Nb PMH en panne	Nb PM en panne
							FPM	FCP	PM	Nb BF				
GOGOUNOU	126494	62269	354	348	1.69%	49.2%	292	8		24	3	0	6	
KALALE	169145	70293	476	365	4 .95%	41.6%	227		58	40	5	0	19	92
KANDI	176683	63593	383	379	1.04%	36.0%	274	3		51	7	0	4	
KARIMAMA	71816	22249	98	95	3.06%	31.0%	63			16	2	0	3	
MALANVILLE	135834	39667	187	185	1.07%	29.2%	151			17	2	0	2	
SEGBANA	82938	42301	219	213	2.74%	51.0%	175			19	4	0	6	
SYNTHESE	762910	300372	1717	1585	1.92%	39.67%	1182	11	58	167	23	0	40	92

PE = Point d'Eau ; 1PE donne de l'eau à 250 habitants ; 1EPE = 1PE ; PMH = 1PE ; PM = 1PE ; AEV = Nb BF ; 1BF = 2PE ; EPE = Equivalent Point d'Eau ; PM = Puits Moderne ; FPM = Forage équipé de Pompe à Motricité Humaine ; FCP = Forage Contre Puits ; BF = Borne Fontaine ; AEV = Adduction d'Eau Villageoise

Source de données : BDI / DG-Eau/DDMEE

En somme, avec l'effectif des communes se retrouvant dans le bassin qui s'accroit de plus en plus et à l'insuffisance des points d'eau, l'accès à l'eau potable demeure encore très préoccupant dans la région. Par ailleurs, de nombreuses actions sont menées par les autorités dans le but de satisfaire les besoins en eau et d'améliorer la gestion des points d'eau.

1.2 Contexte hydrologique, hydroclimatique et végétation

❖ Contexte hydrologique

Le BSK correspond à la majeure partie du bassin versant du fleuve Niger à l'échelle du Bénin avec ses affluents que sont l'Alibori et la Sota. Il est traversé essentiellement par la rivière Sota et ses affluents (Tassinet, Irané, Kokoï). L'Alibori n'a que la partie inférieure de son cours d'eau dans le BSK. Toutes ces rivières sont plus ou moins intermittentes et sont tributaires du fleuve Niger. L'analyse morphologique du réseau hydrographique montre que tous les cours d'eau sont approximativement orientés Nord-Sud, sauf à l'Est du BSK où le socle affleurant a imposé une direction NE-SW à la rivière Illogorou et ses affluents. Le réseau hydrographique du BSK est très dense et se rapproche du type dendritique. Les cours d'eau montrent souvent des coudes à angle droit caractéristiques des formations granitiques et gréseuses et en liaison avec des fractures (Alidou, 1983).

❖ Contexte hydroclimatique

Le climat est de type sahélien. La pluviométrie mensuelle moyenne maximale est observée en août à Kandi, Malanville et Ségbana (Achidi, et al., 2012). La pluviométrie moyenne annuelle (1985-2015) à la station synoptique de Kandi est 1002,4 mm et la température maximale moyenne annuelle (1985-2015) est 34,70 °C. L'Evapotranspiration Potentielle (1985-2015) à la même station est 1703,3 mm (Gbewezoun, 2017).

❖ Végétation

En général, la végétation du BSK est composée par des formations caractéristiques de la zone climatique soudanaise. Certaines espèces, plus spécifiquement sahéliennes, se rencontrent au Nord. Cette végétation est du type savane arbustive à Anogeis leicarpus, Butyrosternum paradoxum (Karité), Daniellia oliveri, Isoberlinia doka et Barkia biglobosa (Néré). La végétation du BSK varie légèrement du Sud au Nord en fonction de la pluviométrie (Alidou, 1983).

Plusieurs forêts sont présentes dans le BSK :

- celles contenues complètement dans le BSK : du Nord au Sud, il y a les forêts de Gouroubi, de Goungoun, de la Sota et de Kandi.
- la forêt des trois rivières (au Sud) et la zone cynégétique de Djona (Nord-Ouest) recouvrant en partie le BSK (Gbewezoun, 2017).

1.3 Contextes géomorphologique et pédologique

❖ Contexte géomorphologique

Du point de vue géomorphologique, le bassin de Kandi est une pénéplaine s'inclinant légèrement vers le Nord (Alidou, 1983). Ce bassin, extrémité Sud du bassin des Iullemmeden, se présente comme une plaine drainée par la Sota et ses affluents qui coulent dans des vallons très évasés (SERHAU, 1992).

En général, la morphologie du BSK comprend une série de "cuestas" aux sommets souvent plats, armés par des cuirasses ou des grès ferrugineux. La topographie présente une altitude moyenne comprise entre 200 et 350 m (Adam et Segla, 1977 in Alidou, 1983). Celle-ci s'élève à 410 m au maximum dans le Sud, puis descend à 160 m dans le Nord sur les bords du fleuve Niger (Figure 2). Les surfaces dont les altitudes se situent entre 200 et 300 m, appartiennent au "relief intermédiaire" élaboré pendant le Tertiaire (Greigert, 1966 in Alidou, 1983).

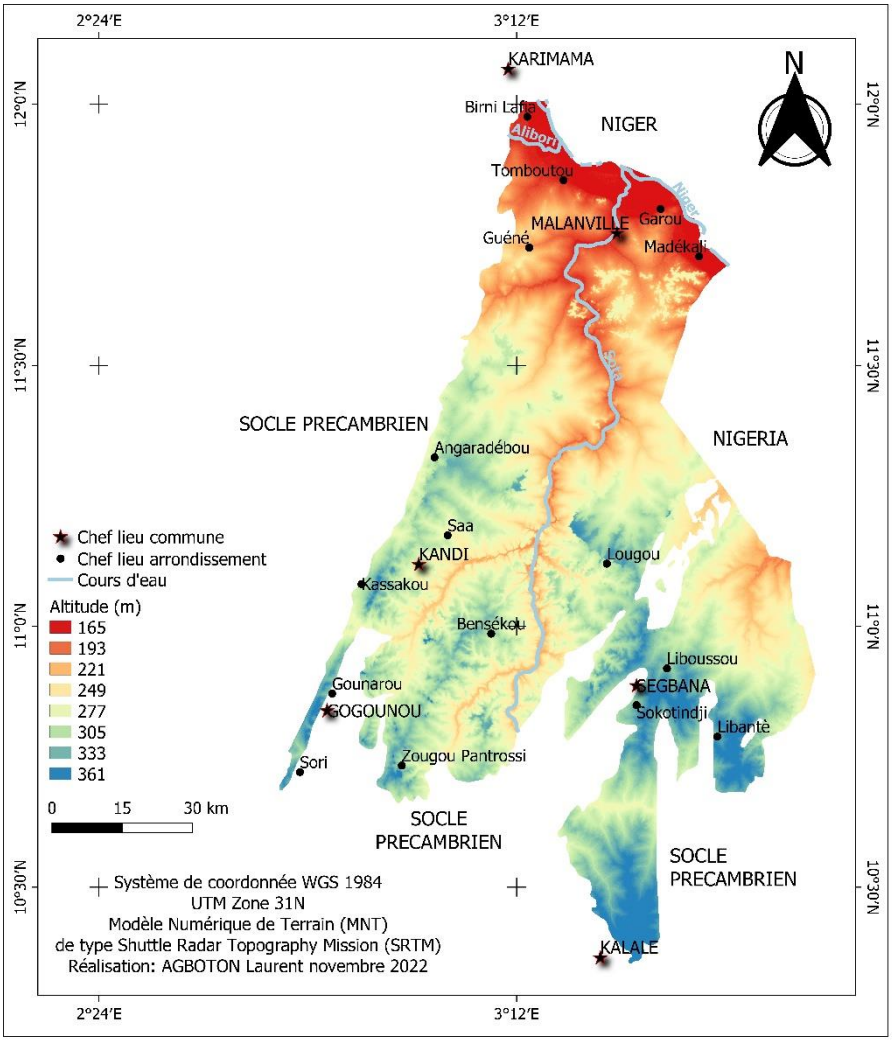


Figure 2 : Carte d'altitude du Bassin Sédimentaire de Kandi

❖ Pédologie

Les sols sont des facteurs déterminants de l'infiltration, ainsi que du ruissellement et l'érosion. Nous rencontrons généralement, comme le montre la Figure 3 ci-dessous, les sols de type ferrugineux tropicaux. Les vallées du fleuve Niger et ses affluents sont caractérisés par des sols alluviaux hydromorphes (Azontonde, 1991).

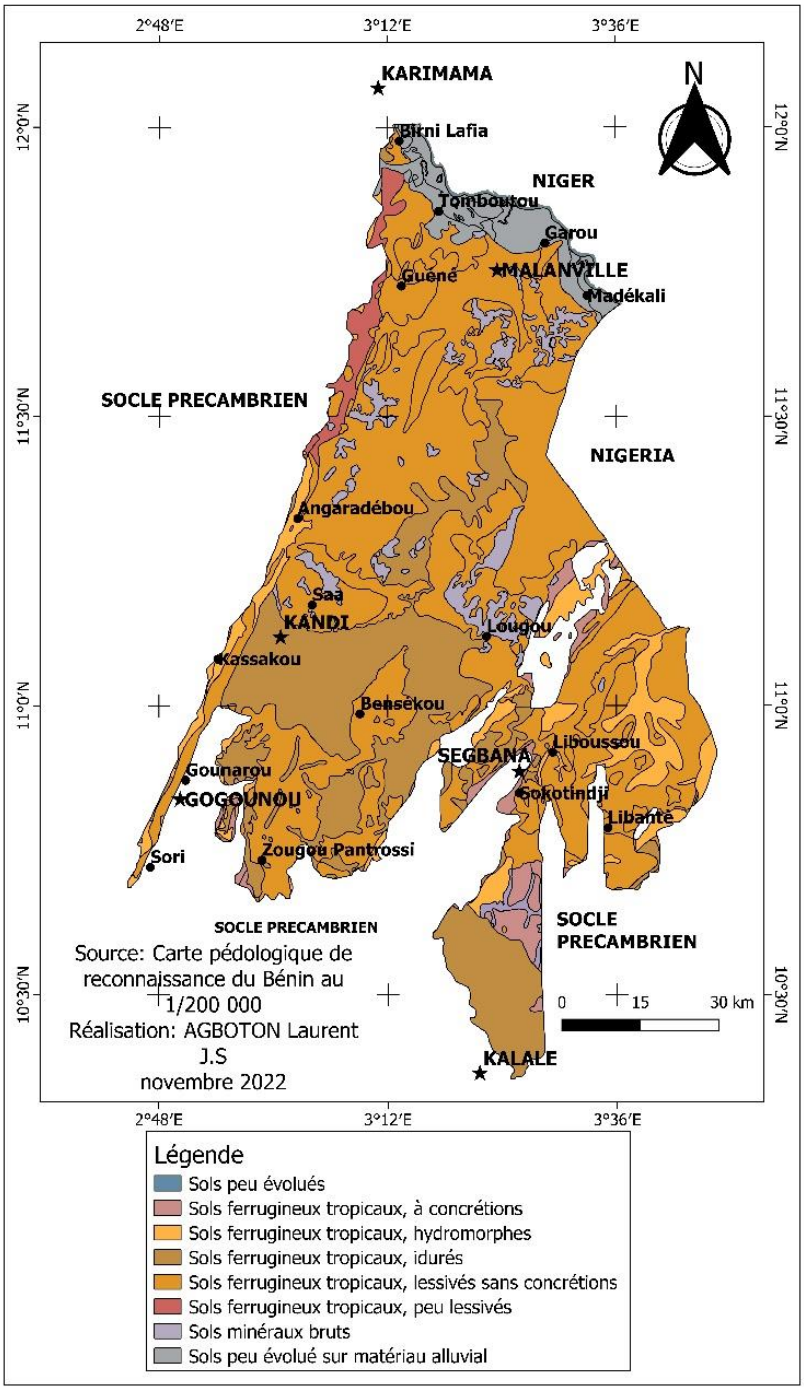


Figure 3 : Carte pédologique du Bassin Sédimentaire de Kandi

1.4 Contexte géologique

Le bassin de Kandi appartient à la même aire de sédimentation que celui des Iullemmeden au Niger et celui de Sokoto au Nigéria (Greigert, 1966 ; Faure, 1966 ; Alidou, 1983). Les formations géologiques présentent les mêmes caractéristiques au Nord-Est du Bénin, au Sud-Ouest du Niger et au Nord-Ouest du Nigéria (Alidou et Lang, 1978 ; Alidou et al., 1979).

Selon Alidou (1983, 1987) et Alidou et al., (1991), la stratigraphie du Bassin de Kandi (Tableau II) peut se résumer, de la base au sommet, comme suit :

- les formations conglomératiques dites de Wéré et de Goungoun ;
- la formation de Kandi ;
- la formation de Sendé ;
- la formation du Continental terminal indifférenciée ;

***Tableau II** : Disposition et âges des formations du bassin de Kandi (Alidou, 1987 ; Seilacher et Alidou, 1988 ; Alidou et al., 1991).*

GROUPES ET FORMATIONS		AGE
	Continental terminal	‘’Post-Eocène moyen et Anté-Quaternaire’’
	Discordance de ravinement	
Groupe de Kandi	Formation de Sendé	Crétacé inférieur
	Discordance de ravinement	
	Formation de Kandi	Silurien-Ordovicien supérieur
	Discordance de ravinement	
	Formation de Wéré et de Goungou	Paléozoïque inférieur
	Discordance angulaire	
	Socle	Précambrien

Plusieurs descriptions ont été faites, notamment par Hubert (1908), Pougnet (1949), (Alidou et Lang, 1978 ; Alidou et al., 1979), Alidou (1983, 1987), Alidou et al., (1983), Seilacher et Alidou (1988), Alidou et al., (1991), Konaté (1996) avec les données découlant des observations de terrain et des synthèses cartographiques. De ce fait, certaines formations ont été subdivisées par Konaté (1996) dont celle de Wéré et celle de Kandi au sein de ce bassin.

Selon les auteurs, la première formation est celle du Cambrien et/ou Ordovicien Supérieur (Figure 4, 5, 6), connue sous le nom de Formation de Wèrè (FW) (Alidou, 1991) et est d'origine continentale. Cette formation a une base conglomératique d'une épaisseur maximale à l'affleurement d'environ 150m (faciès K1 de IRB, 1989, Figure 6) et a un sommet gréseux grossier dont l'épaisseur maximale est d'environ 350m (faciès K2 de IRB, 1989, Figure 6).

La FW est surmontée en discordance de ravinement par un ensemble de dépôts marins dénommés Formation de Kandi (FK) (Alidou et al., 1991). A cette formation, il est possible d'attribuer un âge Ordovicien Terminal – Silurien Inférieur (Konaté, 1996). Elle affleure largement dans la plus grande partie du bassin (Figure 4) et a une puissance de l'ordre de 75m. La FK, a une base épaisse d'environ 40m, constituée de dépôts gréseux fins et caractérise les zones bordières du bassin. D'environ 30m d'épaisseur au sommet, elle est formée de sédiments silteux et gréseux fins, micacés mais essentiellement des siltites (Konaté, 1996) (Figure 5).

Une importante lacune stratigraphique sépare les derniers dépôts marins du Silurien Inférieur de la FK des dépôts sus-jacents continentaux du Crétacé Inférieur, connus sous le nom de Formation de Sendé (FS) (Alidou et al., 1991) (Figure 5).

Les dépôts détritiques de la FS sont localisés seulement au Nord-Est du bassin (Figure 4) et reposent en discordance de ravinement sur ceux sous-jacents (FW et FK). La FS, de faible extension et de faible puissance (20 à 30m) est également en continuité avec les sédiments du bassin de Sokoto au Nigéria (Konaté, 1996).

La FS est surmontée par une formation dite du "Continental terminal" (CT), correspondant à de "vastes épandages détritiques continentaux, remaniés" (faciès sidérolithique), d'âge post-Eocène moyen et anté-Quaternaire (Lang et al., 1986 et 1990). Au Bénin, cette formation se développe surtout à l'Ouest, le long du fleuve Niger (Konaté, 1996) (Figure 4).

La dernière Formation est celle du Quaternaire (FQ). Elle est également peu développée dans le bassin. La FQ tapisse la vallée du Niger et, dans une certaine mesure, celle de la Sota et coiffe certaines cuirasses latéritiques, avec une faible épaisseur, pouvant atteindre au plus 100m (Alidou, 1983). Elle est caractérisée par des épandages détritiques et des accumulations chimiques, surtout ferrugineuses. Des concrétions calcaires y sont toutefois présentes. Ce qui témoignerait d'un épisode climatique proche du type méditerranéen (Alidou, 1983).

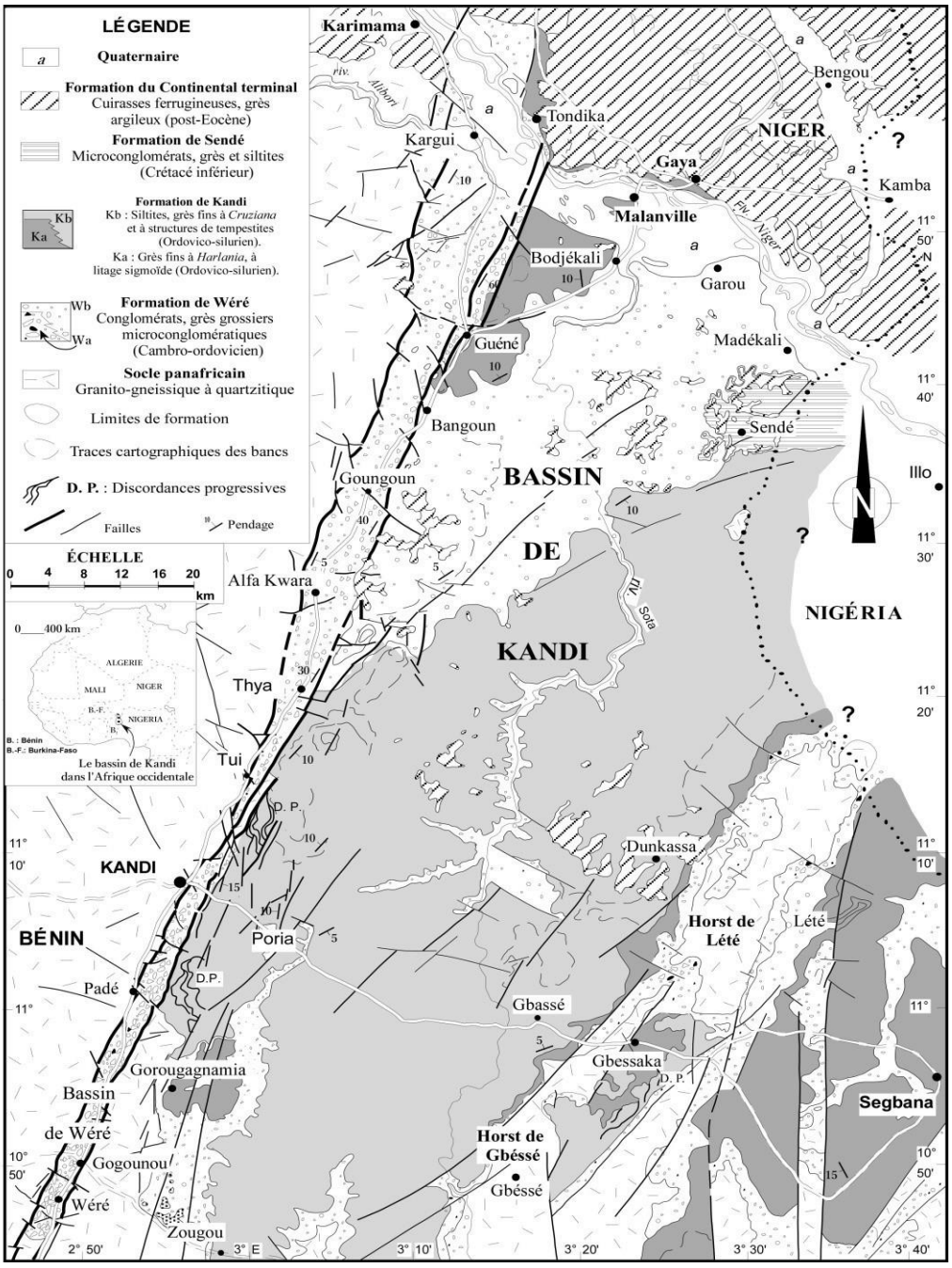
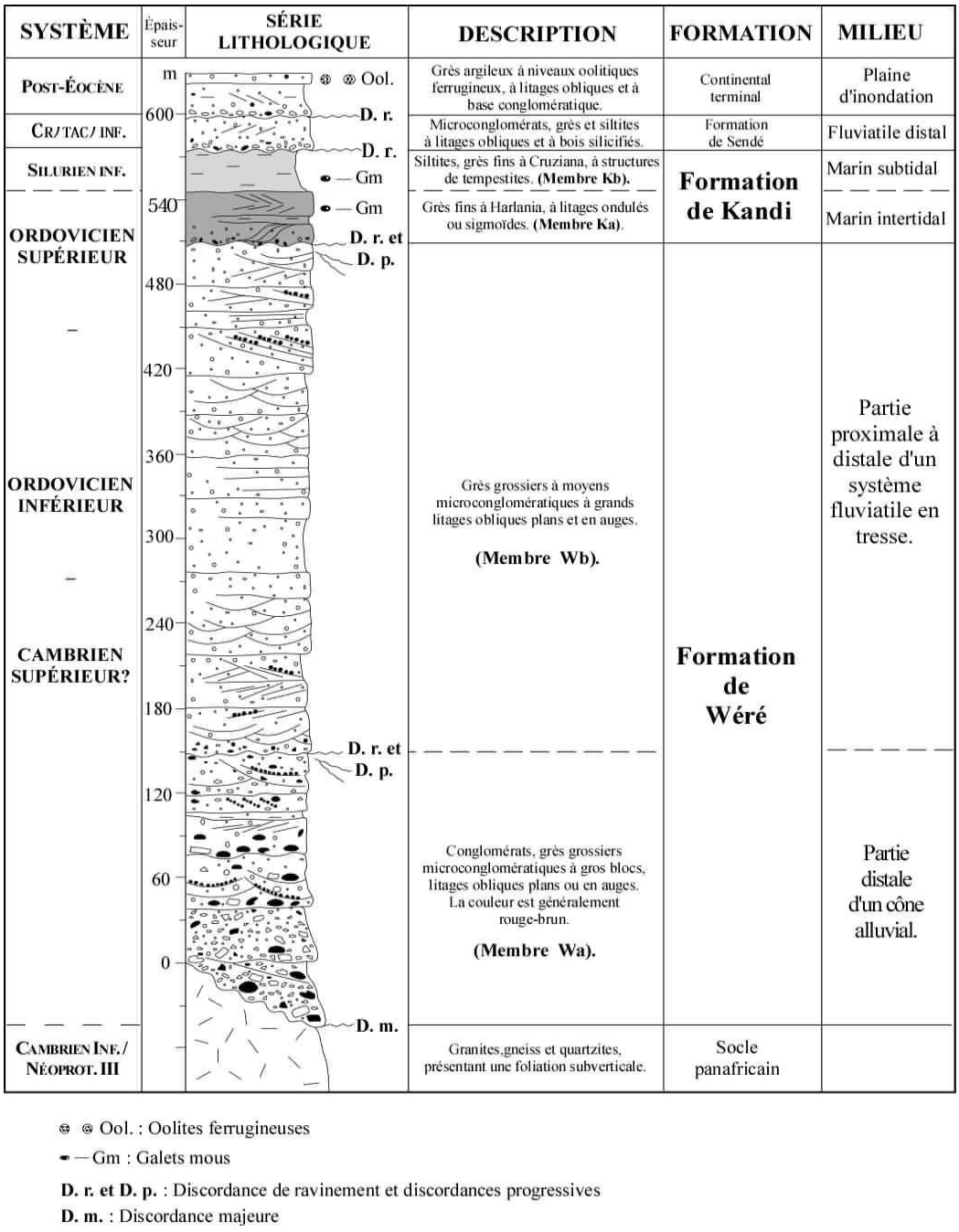


Figure 4 : Carte géologique synthétique du bassin de Kandi (Konaté, 1996)



Ool. : Oolites ferrugineuses

Gm : Galets mous

D. r. et D. p. : Discordance de ravinement et discordances progressives

D. m. : Discordance majeure

Figure 5 : Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Kandi (Konaté, 1996)

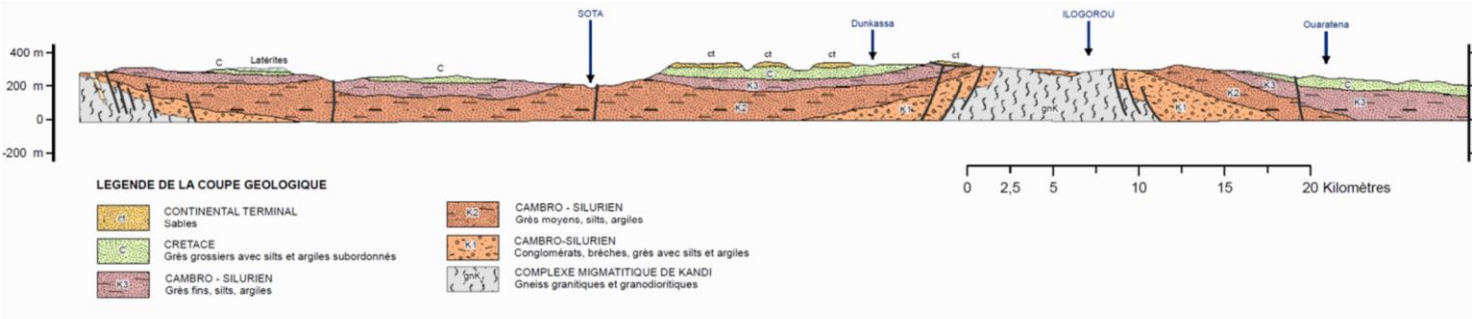


Figure 6 : Coupe géologique du bassin sédimentaire de Kandi (IRB 1989 in Achidi et al., 2012)

1.5 Contexte hydrogéologique

Les caractéristiques des aquifères du bassin ont été amplement décrites par (Gbewezoun, 2017).

Selon (Gbewezoun, 2017), les deux formations suivantes sont distinguées :

- à la base et sur la périphérie nord du bassin, une formation d'épaisseur moyenne 35m, composée essentiellement de grès et de conglomérats reposants en discordance sur le socle précambrien **(**Figure 7). Elle correspondrait à la Formation Continentale de Wèrè (Cambro-Ordovicien) décrite par Boukari (2007).
- la Formation sus-jacente constitue l'essentiel de l'aquifère phréatique et est traversée par les forages d'exploitation sur une épaisseur moyenne de 60m. Elle est composée essentiellement de grès reposant sur la formation dite de Wèrè (Figure 7). Elle correspondrait donc à la Formation de Kandi (Ordovicien Supérieur à Silurien Inférieur). Elle est surmontée au bord du Niger par une formation à faciès variées, correspondant principalement aux alluvions plus ou moins gréso-argileuses du Niger d'âge Quaternaire (Alidou, 1983). Ces deux niveaux constitueraient l'aquifère supérieur décrit par Boukari (2007).

L'aquifère de la Formation de Kandi, semble être le plus exploité dans la région, avec sa caractéristique d'être libre mais localement semi-captif voire captif dans des localités (Gbewezoun, 2017). Il peut être véritablement captif dans les endroits où cette formation est constituée exclusivement de siltites, voire d'argilites. Le Continental Terminal, stérile en général, contribue localement à augmenter l'épaisseur de la zone non saturée Boukari (2007).

L'aquifère de la Formation de Wèrè, couvre tout le bassin, il est le plus étendu et le plus puissant. Il est en général à nappe semi-captive sous les grès fins et siltites de la formation de Kandi. L'aquifère est en continuité hydraulique verticale avec son toit semi-perméable. La rivière Sota qui traverse le BSK du Nord au Sud représente son exutoire naturel (Boukari, 2007).

Il faut également noter la présence d'un autre aquifère à nappe libre et d'extension très réduite, qui a pour réservoir, d'une part les microconglomérats, grès et siltites de la Formation de Sendé, d'autre part les alluvions du fleuve Niger. On le retrouve uniquement au Nord du bassin (Boukari, 2007). Par ailleurs, les aquifères semblent être verticalement et horizontalement en continuité hydraulique (Gbewezoun, 2017).

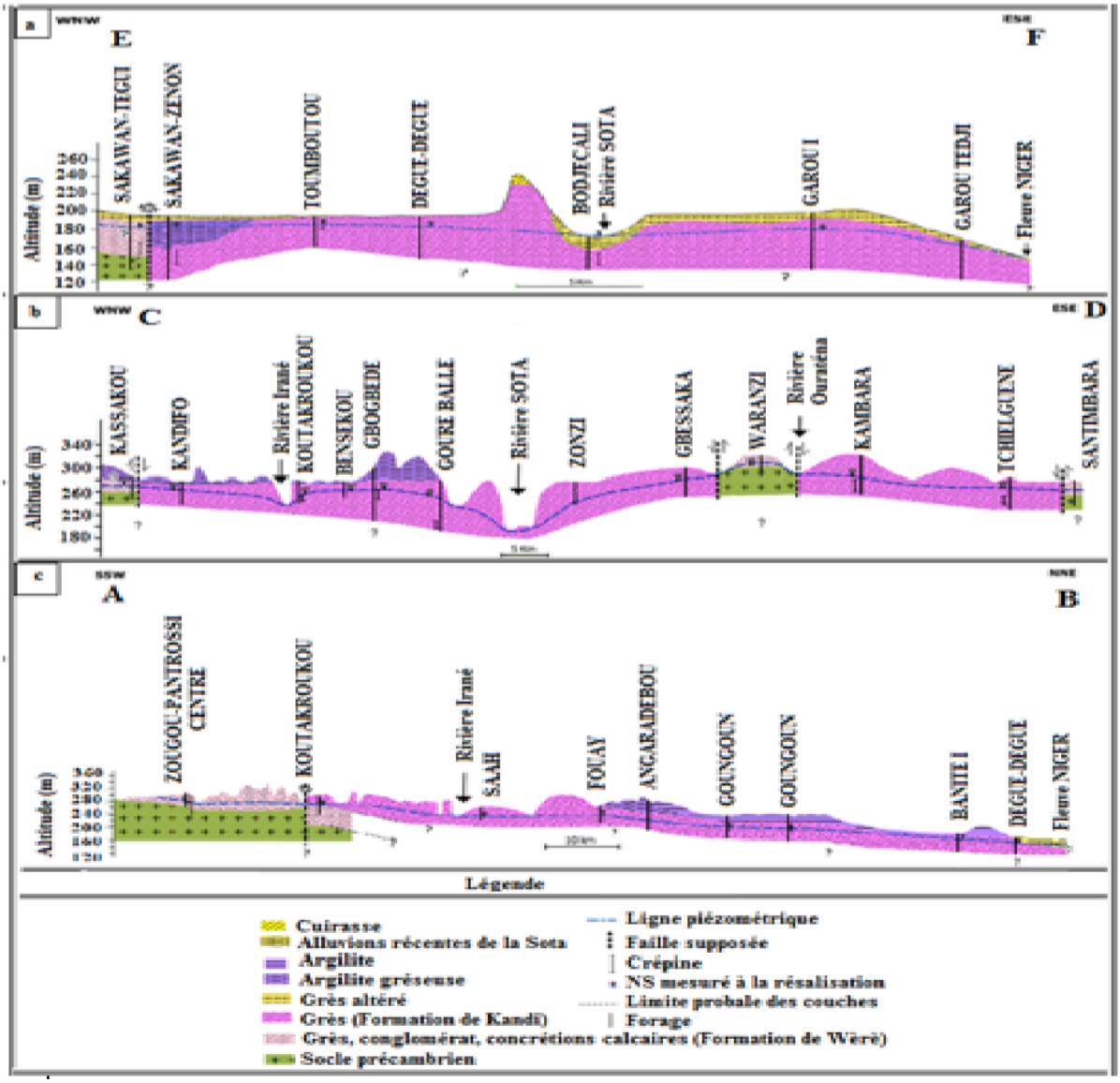


Figure 7 : Coupes hydrogéologiques du bassin sédimentaire de Kandi suivant la direction WNW-ESE et la direction SSW-NNE (Gbewezoun et al., 2021)

Le bilan de la situation actuelle de notre milieu d'étude, montre que la ressource en eau disponible ne satisfait pas les besoins des différentes collectivités locales. Ceci serait dû à une mauvaise gestion et à un manque de sources d'approvisionnement en eau dans la perspective d'un taux d'accroissement démographique qui s'accroit continuellement.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre porte sur l'analyse des données hydro-climatiques et souterraines recueillies sur l'ensemble du bassin. Après avoir décrit très brièvement les moyens par lesquels elles ont été obtenues, nous indiquerons les méthodes de traitement utilisées.

2.1 Matériels de travail

Pour le bon déroulement de notre travail, nous avons utilisé : un ordinateur portable de marque HP muni des logiciels Excel 2013 pour le traitement statistique des données ; Word 2013 pour le traitement de texte ; Qgis 3.16.2 pour la réalisation des cartes sur la zone d'étude ; le langage R pour la réalisation des graphes.

2.2 Méthodologie d'étude

Pour atteindre les objectifs de notre travail, nous avons utilisé une démarche méthodologique subdivisée en trois parties : la recherche documentaire, la collecte des données et le traitement des données collectées.

2.2.1 Recherche documentaire

Dans l'objectif de bien rédiger ce mémoire, nous avons collecté des informations sur la base des documents relatifs à la situation géographique, l'hydrographie, la pédologie, la géologie, l'hydrogéologie du bassin sédimentaire de Kandi qui est notre zone d'étude. Nous avons également orienté nos recherches sur les thèses, les mémoires, les rapports et les publications qui traitent d'une manière ou d'une autre de notre sujet d'étude. La plupart de ces documents ont été trouvés sur internet, certains chez des personnes ayant déjà travaillé sur des thèmes ayant rapport avec notre sujet.

Pour la réalisation des cartes présentées dans le document, on s'est servi d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de type Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et de la carte pédologique de reconnaissance du Bénin au 1/200.000.

2.2.2 Collecte des données

A cette étape de notre travail, nous avons collecté des données auprès des services compétents capables de nous fournir des informations techniques sur notre zone d'étude.

Ainsi :

- nous nous sommes rendu à la Direction Générale de l'Eau (DGEau) pour avoir des données sur les niveaux piézométriques mesurés au niveau des piézomètres installés dans la zone d'étude. Ces niveaux piézométriques ont été mis à notre disposition, suivi

des coordonnées géographiques de chaque piézomètre respectif. En effet, les données ont été collectées respectivement au niveau des piézomètres installés dans les communes de Malanville, Gogounou, Ségbana et Kandi à l'aide d'un enregistreur automatique.

- les données chroniques des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été recueillies à METEO Bénin et sont issues de la station synoptique de Kandi. Elles couvrent une période de trente ans (1991-2021). En ce qui concerne les données de l'évapotranspiration potentielle (ETP), elles couvrent une période allant de 2010 à 2021.

2.2.3 Traitement des données recueillies

Le traitement des données recueillies, a consisté à utiliser plusieurs méthodes et programmes en fonction de nos objectifs. Il s'agit notamment des logiciels adaptés à chacun des objectifs poursuivis.

❖ Estimation de la recharge

La recharge est l'infiltration efficace définie comme étant la quantité d'eau parvenant effectivement à la nappe pendant une durée de référence (Gaye, 1992). Les données piézométriques et de la porosité ont permis d'estimer la recharge moyenne annuelle sur la période d'étude (dix ans) par la méthode des fluctuations piézométriques. Ensuite, les données de l'ETP et de pluie ont servi à la détermination de la recharge par la méthode du bilan hydrique.

❁ Méthode des fluctuations piézométriques

➢ Calcul du niveau piézométrique

Le niveau piézométrique est le niveau statique rapporté au niveau 0 moyen de la mer à une date donnée. Il a été déterminé par la formule suivante :

$$\mathbf{NP = Z - NS} \quad (1)$$

Avec :

- NP (m) le Niveau Piézométrique ;
- Z (m) l'altitude du lieu ;
- NS (m) le Niveau Statique ;

Pour la détermination des altitudes, nous avons conçu un fichier Excel avec les données organisées en des colonnes : une colonne pour les localités, une colonne pour les Longitudes X et une autre pour les Latitudes Y. Ensuite, nous avons importé ce fichier et un MNT (Model

Numérique de Terrain) dans Qgis, et à l'aide de l'extension Point Sampling Tool nous avons extrait les altitudes dans une autre colonne que nous avons nommé Altitudes.

- Variation du niveau piézométrique

Afin de suivre les fluctuations des niveaux piézométriques dans le temps, l'analyse des niveaux statiques mesurés au niveau des piézomètres installés dans le bassin a été faite. En effet, les mesures du NS proviennent de plusieurs piézomètres installés dans la zone d'étude et d'un piézomètre proche de la zone d'étude (Figure 8). Ces mesures ont été prises grâce à un enregistreur automatique. Les données de fluctuations des niveaux piézométriques ont été recueillies pour étudier les liens entre la ressource en eau souterraine et les évènements climatiques.

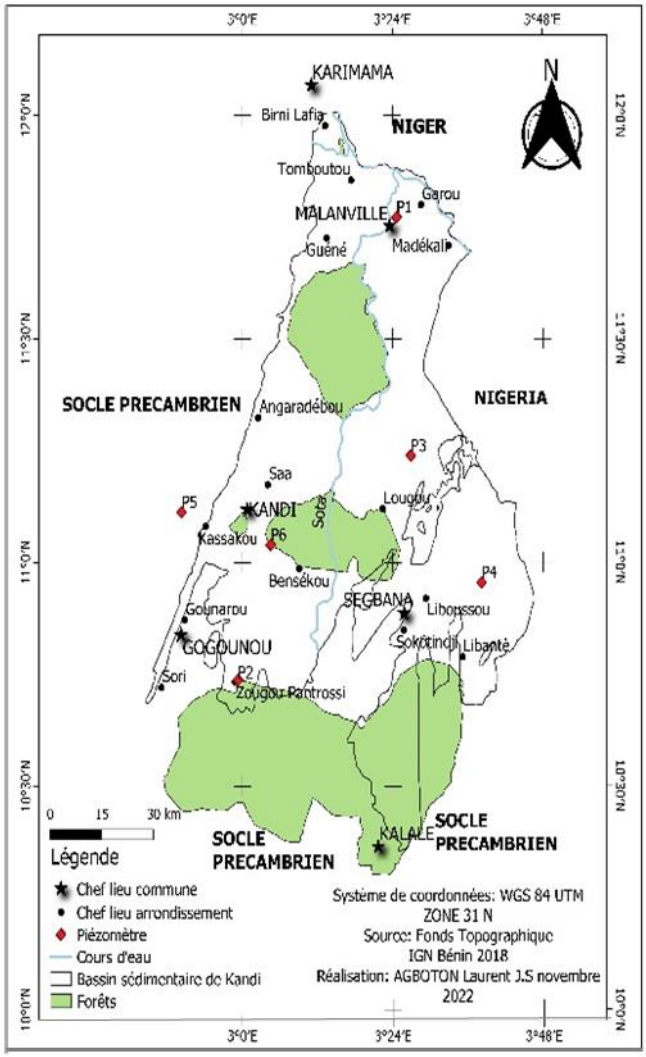


Figure 8 : Répartition des six piézomètres sur l'ensemble du bassin

Source de données : DGEau 2022

Le tableau 3 présente les différents piézomètres utilisés pour cette étude :

Tableau III : Caractéristiques des piézomètres utilisés

N° des piézomètres	Communes	Types de mesure	Source
P1	Malanville	Automatique	DGEau
P2	Gogounou	Automatique	DGEau
P3	Ségbana	Automatique	DGEau
P4	Ségbana	Automatique	DGEau
P5	Kandi	Automatique	DGEau
P6	Kandi	Automatique	DGEau

Source de données : DGEau 2022

Les données piézométriques sont journalières respectivement et se présentes comme suit :

- P1 : 2009 à 2020 ;
- P2 : 2010 à 2020 ;
- P3 : 2009 à 2012 d'une part et 2017 à 2020 d'autre part ;
- P4 : 2009 à 2012, 2014 à 2015 et 2017 à 2020 ;
- P5 : 2008 à 2020 ;
- P6 : 2009 à 2020 ;

Les données pluviométriques mensuelles ont été ajoutées aux données piézométriques mensuelles sur la même période (2010-2020). Pour ce faire, un tableau Excel est conçu portant les années dans la première colonne, les hauteurs de pluies dans la colonne suivante et les niveaux piézométriques dans la dernière colonne. Après cela, on trace la courbe de l'évolution temporelle des niveaux piézométriques. Nous avons ainsi à l'abscisse le temps (les années), à l'axe principal les hauteurs de pluies mensuelles et à l'axe secondaire les niveaux piézométriques mensuels.

- Amplitudes piézométriques

L'amplitude piézométrique provoquée par les recharges dans le secteur d'étude est déduite des fluctuations piézométriques temporelles. Pour chacun des piézomètres, l'amplitude moyenne a été estimée sur les dix ans (2010-2020) de la période d'étude. La lame d'eau se définit comme étant la hauteur de précipitations qui s'écoule en moyenne par unité de temps (mois ou année). Elle s'exprime en millimètres par unité de temps (mois ou année) (Fortitou, 2022). Cette dernière est déterminée en faisant le produit de la moyenne des amplitudes piézométriques de la période d'étude par la porosité efficace au niveau de chaque piézomètre. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$L_{eau} = Sy * Ampl\ moy \quad (2)$$

Avec :

- L_{eau} (m): Lame d'eau
- Sy (%) : porosité efficace
- Ampl moy (m) : amplitude moyenne

Pour ce faire, nous avons calculé les amplitudes des fluctuations piézométriques de chaque année de la période d'étude. Nous avons retenu une porosité de drainage de 2% sur toute l'étendue de notre zone d'étude (Séguis et al., 2011), puis la moyenne des amplitudes de fluctuations piézométriques sur la période d'étude a été calculée.

Le tableau Excel a été utilisé pour la réalisation des courbes de variation du niveau piézométrique en fonction du temps (année). Voir Annexe (1 à 6) pour la présentation de l'amplitude des fluctuations piézométriques de chaque piézomètre en 2011.

- Bilan hydrique

Pour la détermination du bilan hydrique, nous avons choisi la méthode de Thornthwaite compte tenu des données disponibles. Les paramètres recherchés sont l'évapotranspiration réelle (ETR), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'infiltration efficace ou la recharge.

- Si **P > ETP**, alors :

  * ETR = ETP

  * il reste un excédent (P – ETP) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

- Si **P < ETP** :

  On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit :

  * ETR = P + min (RFU, ETP - P)

  * RFU = 0 ou RFU + P – ETP

Si on considère que le ruissellement est négligeable, l'infiltration des eaux est obtenue par :

$$I = P - ETR$$

Toutes ces données collectées, ont été soigneusement traitées à l'aide des différents matériels et des méthodes précédemment cités. Les résultats issus de tout cela font l'objet du chapitre à venir.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

A l'issu de tous les propos développés dans les chapitres précédents, ce dernier chapitre a pour but de renseigner la valeur de la recharge des nappes du bassin, qui, participent au renouvellement de la ressource. Nous décrirons la variation du niveau des nappes en fonction des changements climatiques. Ensuite, nous préciserons l'écart entre ces variations au cours de chaque année de notre période d'étude. Nous chercherons alors à comparer ces résultats et à faire des commentaires, qui feront objet d'une appréciation de nos travaux.

3.1 Résultats

3.1.1 Détermination de la recharge

La gestion de l'eau souterraine dans une optique de développement durable nécessite la connaissance des taux de recharge puisque celle-ci constitue un élément clé du bilan hydrique qu'il faut connaître pour ne pas surexploiter la ressource. De plus, la recharge joue un rôle important dans le débit des cours d'eau, dans la vulnérabilité des aquifères, dans l'écologie des tourbières (milieux humides) et peut avoir un impact sur certains facteurs socio-économiques (Alley & Leake, 2004 ; Sophocleous & Devlin, 2004 ; Devlin & Sophocleous, 2005 ; Healy, 2010). Il existe plusieurs méthodes de détermination de la recharge dont la méthode du bilan hydrologique, la méthode par la modélisation numérique, la méthode du bilan de masse des chlorures, la méthode de l'analyse de la fluctuation piézométrique et bien d'autres méthodes (Soro, 2017). Les méthodes utilisées pour notre étude sont l'analyse de la fluctuation piézométrique et la méthode du bilan hydrique, en raison des données disponibles. Par ailleurs, les méthodes basées sur les données des eaux souterraines donnent généralement des estimations de la recharge plus précises (Scanlon et al. 2002 in Soro, 2017).

3.1.1.1 Méthode des fluctuations piézométriques

- Variation du niveau piézométrique

Les données des niveaux statiques prises sur les piézomètres P1, P2, P3, P4, P5 et P6 ont permis de réaliser cette partie de l'étude. Ils représentent l'ensemble des piézomètres situés dans le bassin de Kandi et autour du bassin. Les mesures ont été effectuées pendant la période de basse eau et de haute eau. Les fluctuations journalières ont été suivies au moyen de sondes automatiques installées dans les piézomètres de Malanville, Gogounou, Ségbana, et de Kandi. Pour notre étude, les données pluviométriques utilisées sont journalières. Les données de l'année 2013, 2014, 2015 et 2016 du piézomètre P3 n'ont pas été prises en compte à cause de l'absence de celles-ci lors de la collecte de données. Celles de l'année 2013 et de l'année 2016

du piézomètre P4 également. Par ailleurs, afin de mieux observer l'évolution temporelle des niveaux piézométriques, les chroniques piézométriques ont été comblées par leur droite de régression (Annexe 8 à 12).

La présentation temporelle ci-dessous (Figure 9 à 14**)** portera sur les graphes pluie mensuelle-piézométrie mensuelle (2010-2020) de chaque piézomètre :

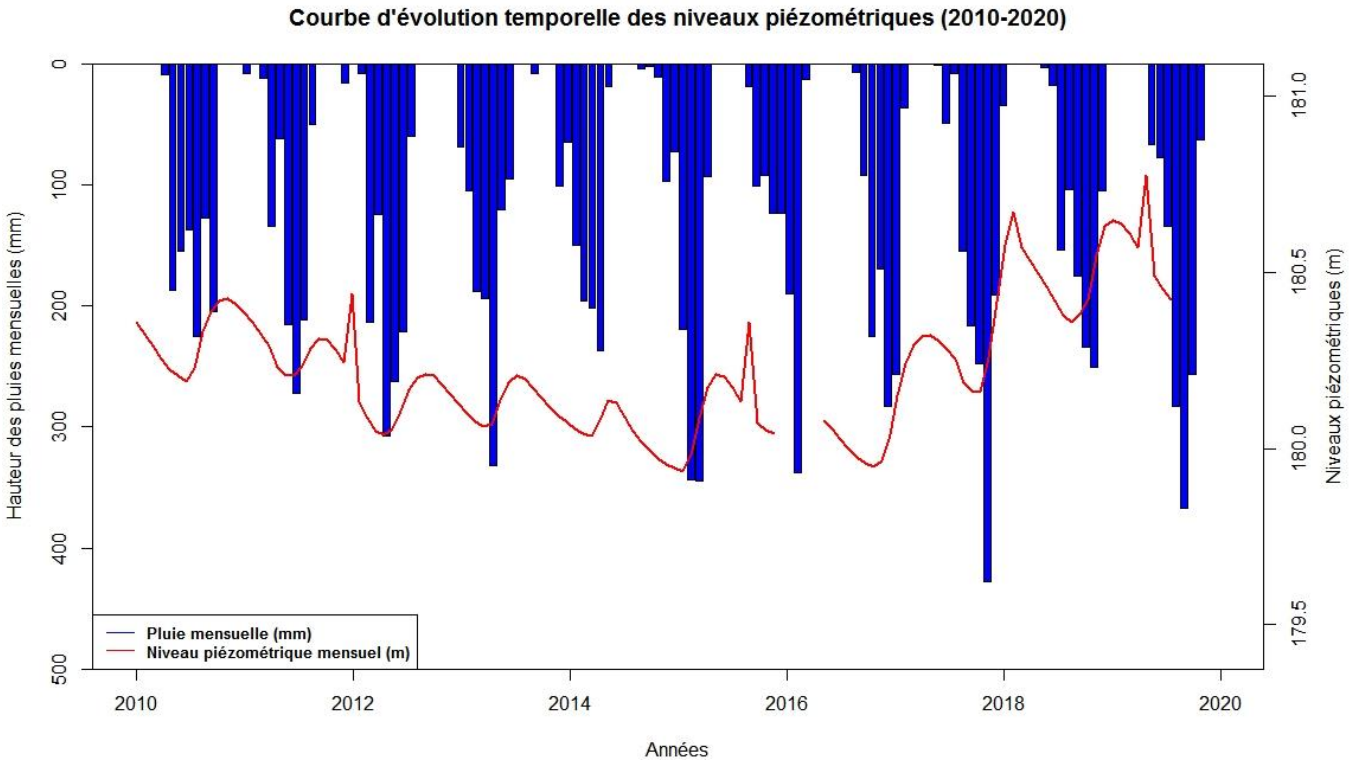


Figure 9 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P1 à Malanville

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 179,44 m à 181,03 m. L'analyse de ce graphe nous montre que le niveau piézométrique monte en période de sécheresse et baisse en période pluvieuse. Le niveau commence à baisser généralement avant la plus grande intensité de pluie. Une remontée est ensuite observée jusqu'en juillet, période avant laquelle on enregistre le pic des hauteurs de pluie. Il ressort de l'analyse de ce graphe que la recharge de la nappe d'eau se fait entre le mois de décembre et de juillet. Il faut également noter une baisse considérable du niveau piézométrique au cours des trois dernières années.

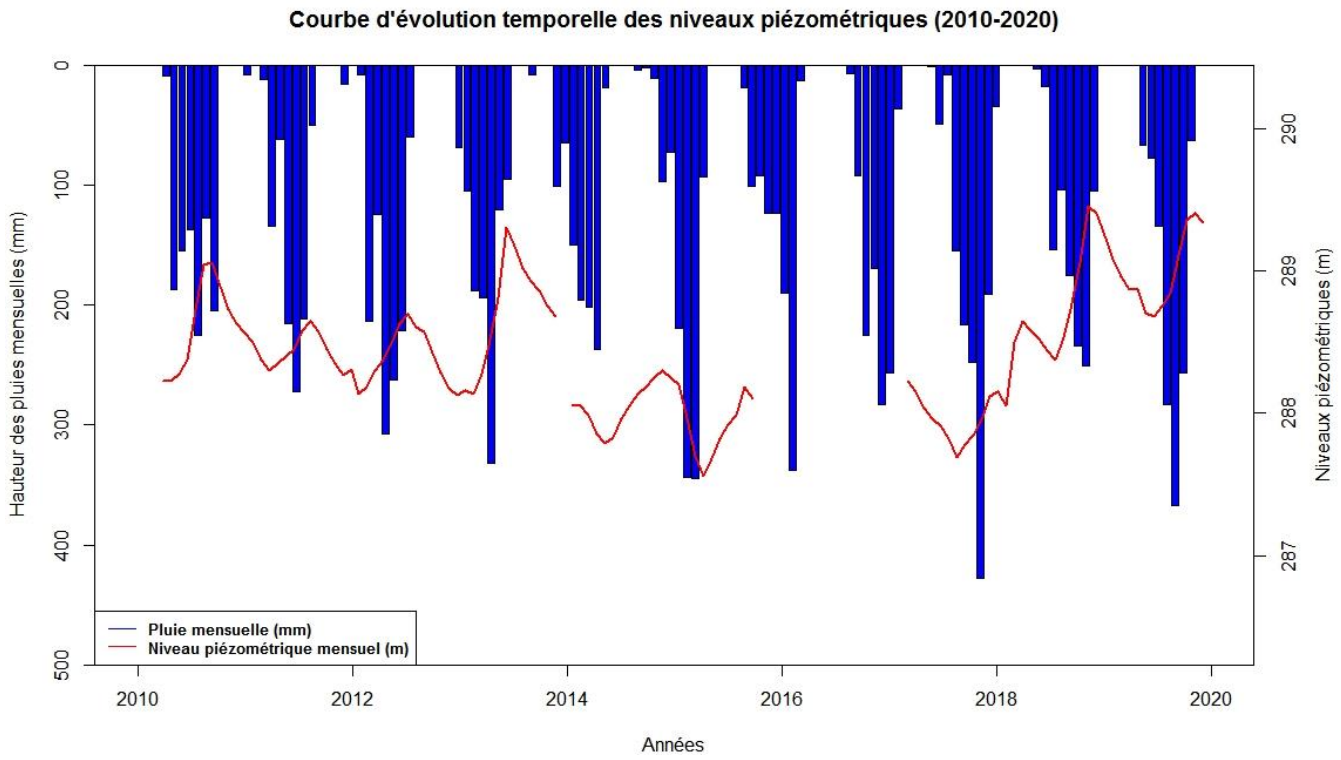


Figure 10 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P2 à Gogounou

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 286,4 m à 290,3 m. L'analyse de ce graphe nous montre que le niveau piézométrique monte en période de sécheresse et baisse en période pluvieuse. Le niveau commence à baisser généralement après la dernière précipitation. Une remontée est ensuite observée jusqu'en mai. Il ressort de l'analyse de ce graphe que la recharge de la nappe d'eau se fait entre le mois de novembre et de mai.

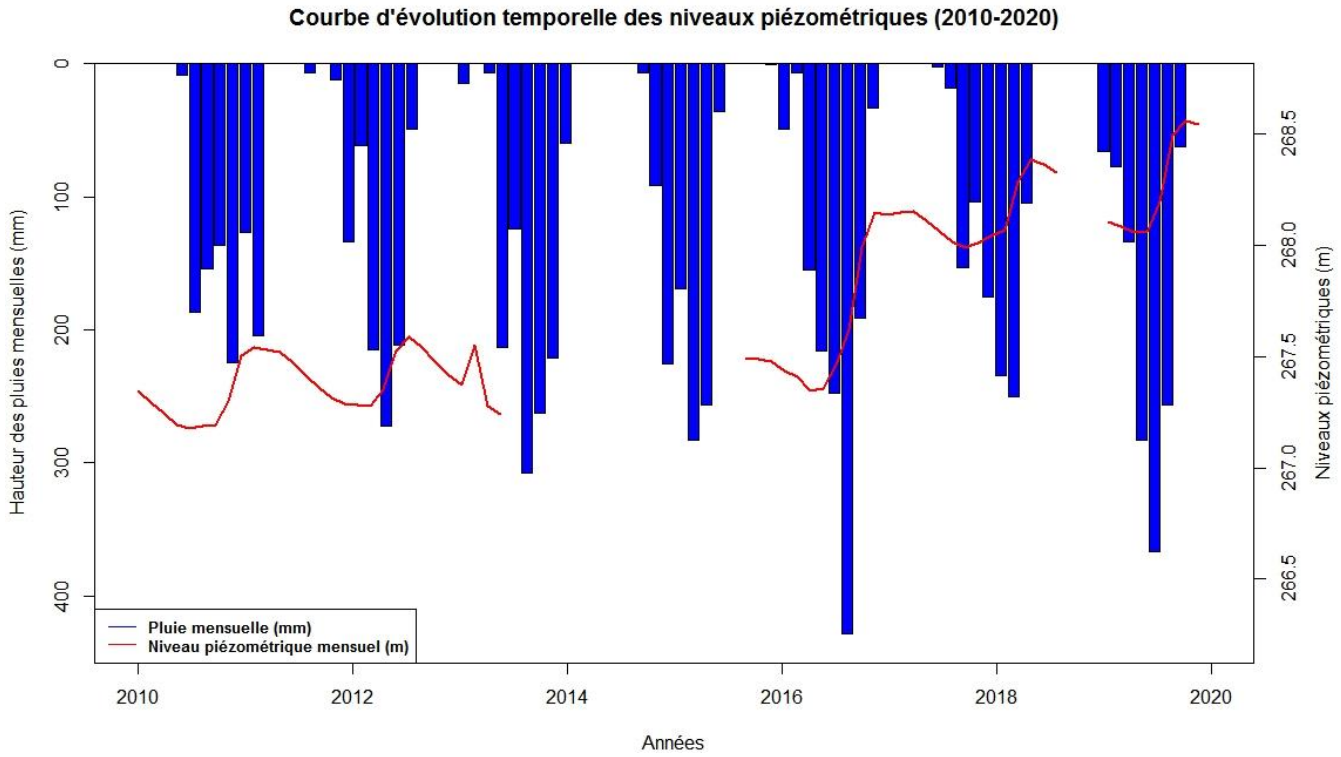


Figure 11 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P3 à Ségbana

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 266,2 m à 268,7 m. L'analyse de ce graphe nous montre que le niveau piézométrique monte en période de sécheresse et baisse en période pluvieuse. Le niveau commence à baisser généralement avant la plus grande intensité de pluie. Une remontée est ensuite observée jusqu'en juillet, période avant laquelle on enregistre le pic des hauteurs de pluie. Il ressort de l'analyse de ce graphe que la recharge de la nappe se fait entre le mois d'octobre (fin des précipitations) et de juillet (période avant la plus grande précipitation de la saison). Il faut également noter une baisse considérable du niveau piézométrique au cours des trois dernières années.

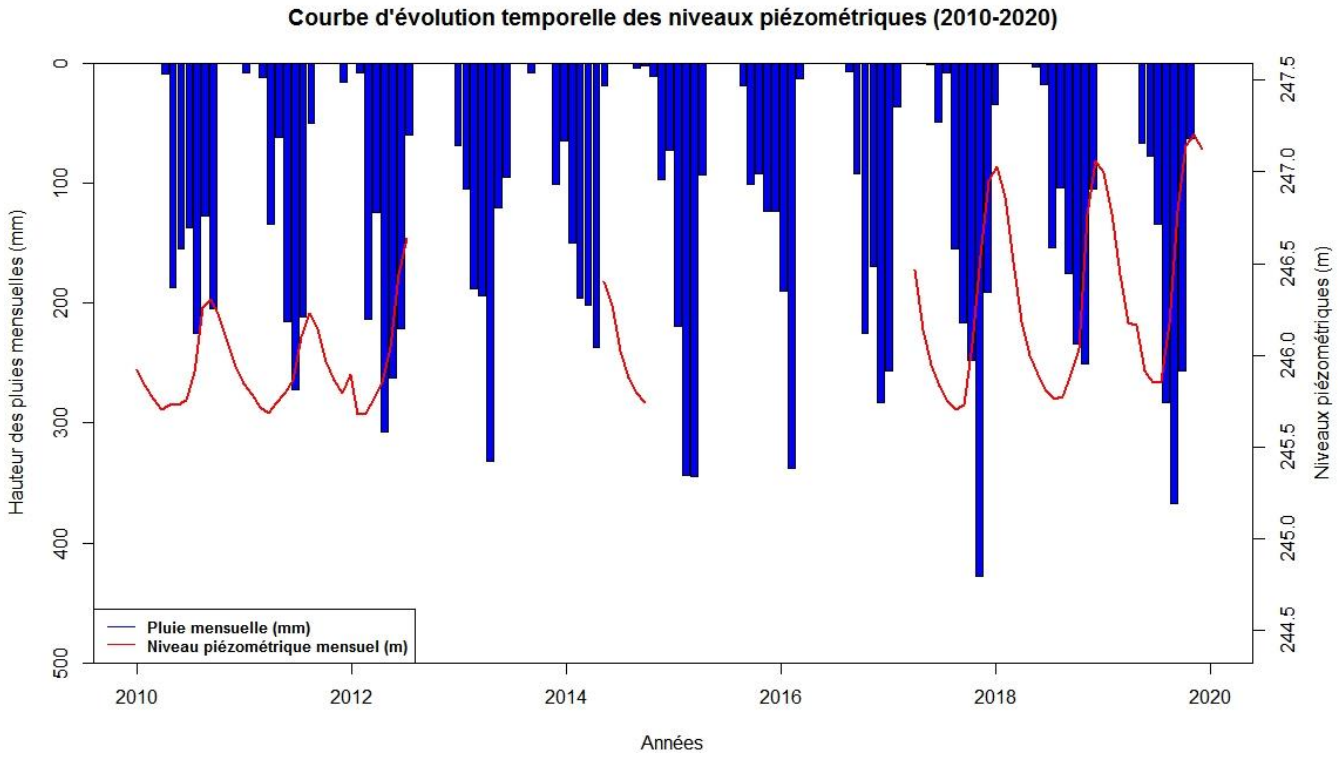


Figure 12: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P4 à Ségbana

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 244,4 m à 247,5 m. L'analyse de ce graphe nous montre que le niveau piézométrique monte en période de sécheresse et baisse en période pluvieuse. On remarque un mouvement d'alternance constitué d'une montée et d'une descente en fonction de la variation des saisons. En effet, le niveau commence à baisser généralement avant la plus grande intensité de pluie. Une remontée est ensuite observée jusqu'en juillet, période avant laquelle on enregistre le pic des hauteurs de pluie. Il ressort de l'analyse de ce graphe que la recharge se fait entre le mois d'octobre (fin des précipitations) et de juillet (période avant la plus grande précipitation de la saison).

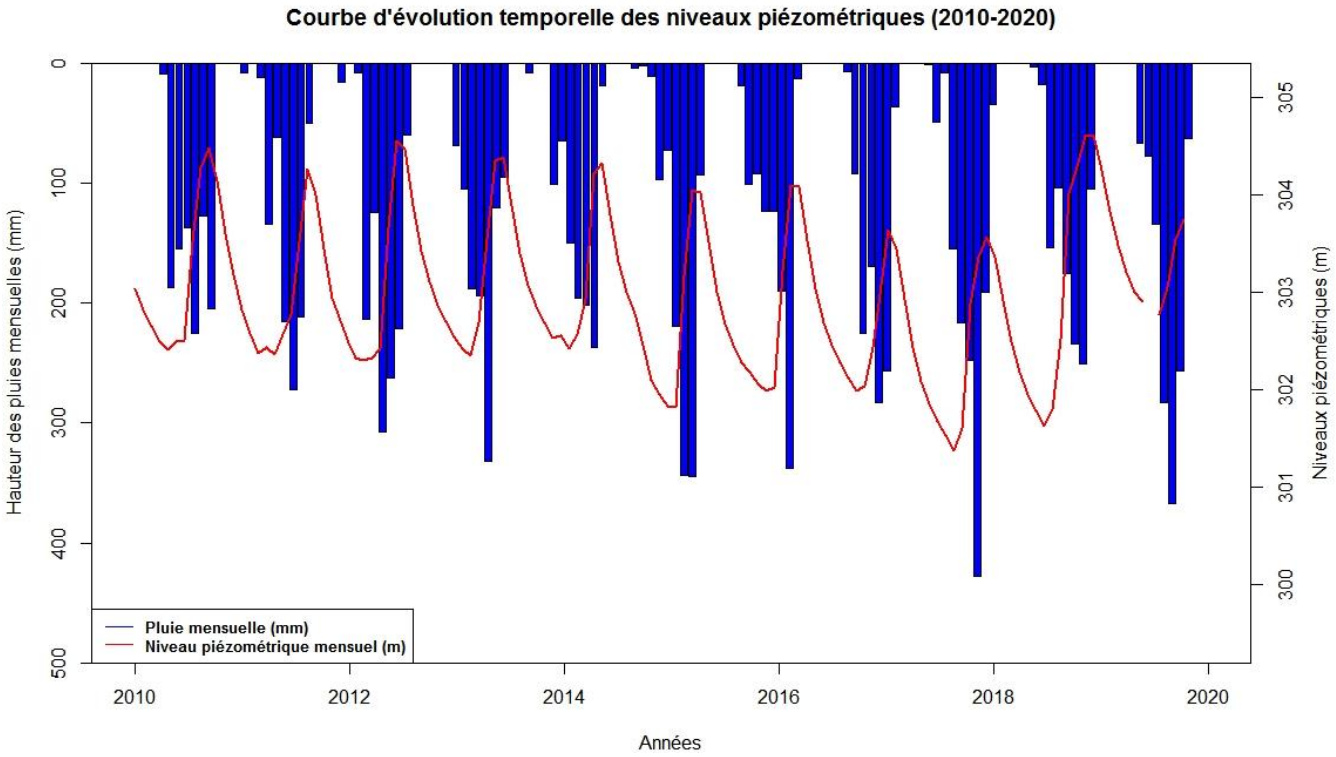


Figure 13: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P5 à Kandi

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 299,4 m à 305,1 m. L'analyse de ce graphe nous montre que le niveau piézométrique monte en période de sécheresse et baisse en période pluvieuse. On remarque un mouvement d'alternance constitué d'une montée et d'une descente en fonction de la variation des saisons. En effet, le niveau commence à baisser généralement avant la plus grande intensité de pluie. Une remontée est ensuite observée jusqu'en juillet, période avant laquelle on enregistre le pic des hauteurs de pluie. Il ressort de l'analyse de ce graphe que la recharge se fait entre le mois d'octobre (fin des précipitations) et de juillet (période avant la plus grande précipitation de la saison).

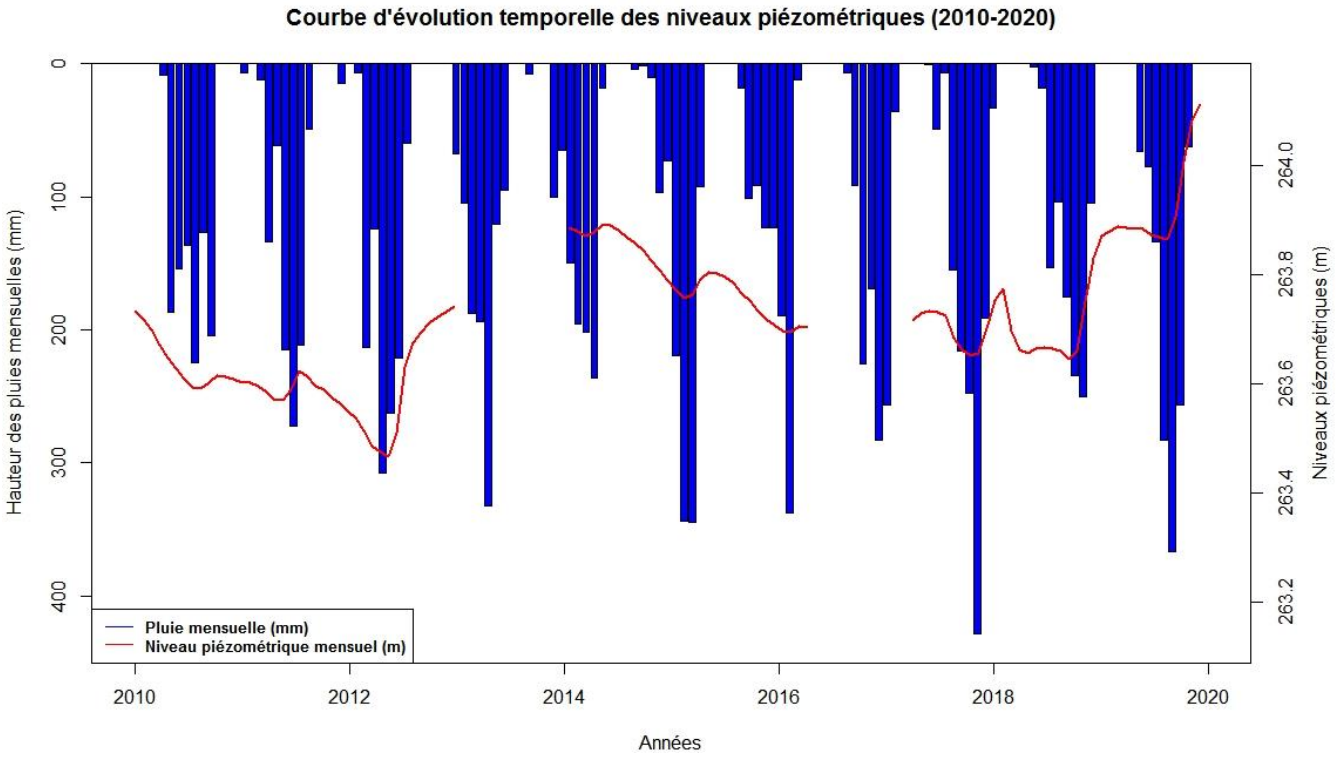


Figure 14: Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P6 à Kandi

Source de données : DGEau et Météo Bénin (2022)

Les valeurs des niveaux piézométriques varient de 263,1 m à 264,1 m. On remarque que le niveau varie légèrement d'une saison à une autre. Les plus grandes variations ont été enregistrées entre les années 2012 et 2013, ensuite entre les années 2019 et 2020. Il ressort de l'analyse de ce graphe que le niveau piézométrique monte progressivement durant la période pluvieuse et que la recharge se fait au même moment que les séries de pluies.

- Amplitudes piézométriques

L'amplitude des niveaux piézométriques de chaque année est obtenue graphiquement à partir de la courbe de variation des fluctuations du niveau piézométrique au niveau de chaque piézomètre (P1, P2, P3, P4, P5, P6). Ensuite, la moyenne des amplitudes préalablement déterminée est calculée. Les amplitudes des remontées piézométriques de chaque piézomètre par année et leurs moyennes sont présentées dans les Tableau IV à IX ci-dessous.

.

Tableau IV : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P1 à Malanville

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum (m)	180,38	180,35	180,12	179,97	179,91	179,96	179,92	180,17	180,89	180,80	180,75	-
Minimum (m)	179,91	179,93	179,63	179,66	179,61	179,43	179,63	179,46	179,84	180,18	180,32	-
Ecart type (m)	0,15	0,12	0,15	0,10	0,08	0,19	0,08	0,25	0,32	0,20	0,12	-
Amplitude (m)	0,47	0,41	0,49	0,31	0,30	0,54	0,29	0,72	1,05	0,62	0,43	0,51

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 0,29 m à 1,05 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2016 et la plus forte en 2018. L'amplitude moyenne du piézomètre P1 est de 0,51 m.

Tableau V : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P2 à Gogounou

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum (m)	289,66	288,68	288,77	290,03	289,28	287,98	287,56	287,79	288,83	290,47	290,26	-
Minimum (m)	287,66	287,88	287,54	287,50	286,79	286,26	287,05	287,48	286,58	288,00	288,65	-
Ecart type (m)	0,67	0,23	0,39	0,78	0,91	0,52	0,14	0,09	0,47	0,78	0,52	-
Amplitude (m)	2,00	0,80	1,23	2,53	2,48	1,72	0,50	0,31	2,25	2,47	1,61	1,63

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 0,31 m à 2,53 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2017 et la plus forte en 2013. L'amplitude moyenne du piézomètre P2 est de 1,63 m.

Tableau VI : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P3 à Ségbana

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum (m)	266,89	267,01	266,71	-	-	-	-	266,82	268,04	268,43	268,75	-
Minimum (m)	266,20	266,38	266,33	-	-	-	-	266,76	266,48	267,64	267,74	-
Ecart type (m)	0,26	0,20	0,38	-	-	-	-	0,01	0,58	0,26	0,38	-
Amplitude (m)	0,69	0,63	0,38	-	-	-	-	0,06	1,56	0,78	1,01	0,73

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 0,06 m à 1,56 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2017 et la plus forte en 2018. L'amplitude moyenne du piézomètre P3 est de 0,73 m.

Tableau VII : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P4 à Ségbana

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum (m)	245,73	245,58	246,39	-	245,91	244,95	-	246,32	247,17	247,27	247,56	-
Minimum (m)	244,48	244,42	244,40	-	244,96	244,55	-	245,66	244,46	244,58	244,69	-
Ecart type (m)	0,44	0,35	0,62	-	0,33	0,12	-	0,20	0,97	0,97	1,00	-
Amplitude (m)	1,25	1,16	1,99	-	0,94	0,40	-	0,66	2,71	2,69	2,87	1,63

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 0,4 m à 2,87 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2015 et la plus forte en 2020. L'amplitude moyenne du piézomètre P4 est de 1,63 m.

Tableau VIII : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P5 à Kandi

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum	304,92	304,57	305,14	304,91	304,89	304,44	304,75	303,60	303,47	305,28	303,75	-
Minimum	301,19	301,11	300,98	301,10	301,16	300,09	300,41	300,43	299,34	299,70	301,83	-
Ecart type	1,33	1,12	1,45	1,25	1,15	1,38	1,34	0,93	1,37	2,11	0,54	-
Amplitude (m)	3,73	3,46	4,16	3,81	3,73	4,34	4,33	3,17	4,13	5,58	1,92	3,85

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 1,92 m à 5,58 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2020 et la plus forte en 2019. L'amplitude moyenne du piézomètre P5 est de 3,85 m.

Tableau IX : Amplitudes de niveau piézométrique de chaque année du piézomètre P6 à Kandi

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Maximum (m)	263,58	263,39	263,51	263,57	263,81	263,78	263,66	263,55	263,63	263,80	264,15	-
Minimum (m)	263,32	263,29	263,13	263,51	263,76	263,58	263,48	263,50	263,40	263,39	263,74	-
Ecart type (m)	0,08	0,03	0,12	0,02	0,01	0,06	0,06	0,01	0,07	0,14	0,11	-
Amplitude (m)	0,26	0,10	0,38	0,06	0,05	0,20	0,18	0,04	0,23	0,41	0,41	0,21

Les valeurs des amplitudes calculées varient de 0,04 m à 0,41 m. La plus faible valeur d'amplitude est obtenue en 2017 et la plus forte en 2019. L'amplitude moyenne du piézomètre P6 est de 0,21 m.

La lame d'eau obtenue dans chaque commune est inscrite dans le tableau suivant :

Tableau X : Lame d'eau (Leau) obtenue par commune

Communes	Malanville (P1)	Gogounou (P2)	Ségbana (P3)	Ségbana (P4)	Kandi (P5)	Kandi (P6)
Porosité (%)	2					
Leau (m/an)	0,010	0,033	0,015	0,033	0,077	0,004

Nous pouvons donc considérer que la recharge est de **10 mm/an** pour la commune de Malanville (P1), **33 mm/an** pour la commune de Gogounou (P2), **15 mm/an** pour la commune de Ségbana (P3), **33 mm/an** pour la commune de Ségbana (P4), **77 mm/an** pour la commune de Kandi (P5) et enfin de **4 mm/an** pour la commune de Kandi (P6). La moyenne des précipitations enregistrées sur le bassin au cours de ces dix années est d'environ **1106 mm**.

3.1.1.2 Méthode du bilan hydrique

Le bilan hydrique a été établi à la station de Kandi, avec son périmètre d'action qui couvre toute notre zone d'étude. La méthode de Thornthwaite utilisée, couvre une période allant de 2010 à 2020. Le récapitulatif des calculs des différents paramètres du bilan (2010 à 2010) est présenté dans le tableau XI et ceux calculés année par année, en annexe 13 à 23.

Tableau XI : Tableau récapitulatif du bilan estimé par la méthode de Thornthwaite de 2010 à 2020

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
ETP (mm)	800,2	1027,1	826,5	858,7	1015,7	1060,9	898	924,5	865,9	873,5	906,7	914.3
P (mm)	1042,9	963,7	1210,4	1102,2	975,1	1186,2	997	1068,7	1328,5	1042,5	1246,3	1105.8
ETR (mm)	414,4	500,9	432,4	493,1	504,1	478,5	479,1	418,1	459	448,7	489,9	465.3

I (mm)	728,5	585,6	878	709,1	571	807,7	617,9	750,6	969,5	693,8	856,4	742.6

L'analyse de ces résultats montre que, la quantité de précipitation enregistrée sur le bassin de 2010 à 2020 est en moyenne de **1105,8 mm/an** avec une ETP estimée à **914,3 mm/an**. L'ETR, qui exprime l'ensemble des précipitations qui retourne effectivement dans l'atmosphère est de **465,3 mm/an** soit 42% des précipitations évaporées. L'estimation de la recharge par la méthode de Thornthwaite nous a donné une valeur moyenne de **742,6 mm/an**.

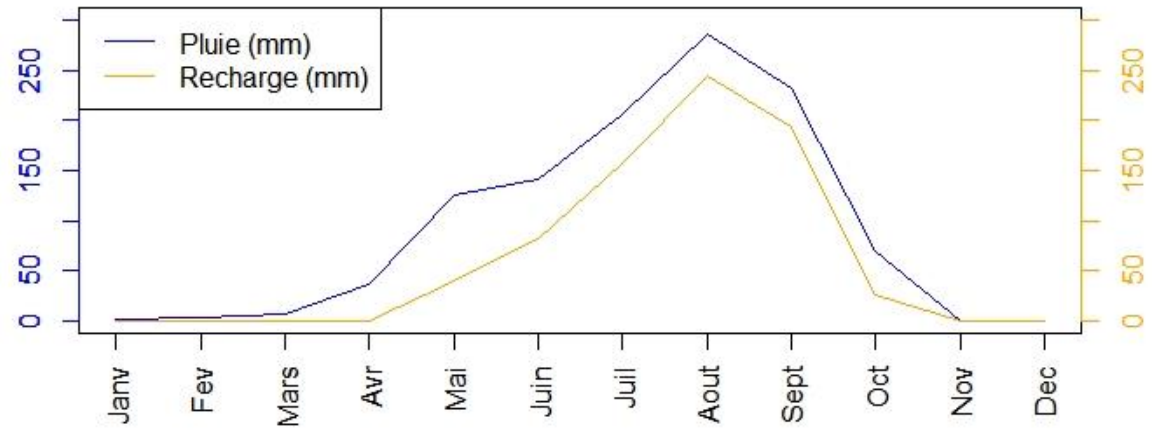


Figure 15: Evolution mensuelle de la pluie et de la recharge (2010 à 2020)

Cette figure montre que la courbe de la recharge a une allure similaire à celle de la pluie. Au cours de la saison pluvieuse, les valeurs de recharge varient de 26,48 mm (Octobre) à 243,72 mm (Août) de 2010 à 2020. Le mois d'Août avec une valeur de précipitation de 285,37 mm équivaut au mois le plus pluvieux de la période correspondant ainsi au mois dans lequel la nappe est fortement rechargée. Ceci montre que la recharge s'effectue principalement pendant la période pluvieuse.

3.2 Discussion

L'objectif de ce mémoire est d'estimer la recharge par la méthode des fluctuations piézométriques. A cet effet, il a été question de déterminer le niveau piézométrique, d'étudier la variation des nappes en fonction des changements climatiques, d'estimer la lame d'eau.

Les résultats qui ont résulté de cette méthodologie, nous amène à conclure que le climat de la zone est composé de deux saisons. La première qui débute en avril et prend fin en octobre (saison pluvieuse) et la seconde qui débute en novembre et prend fin en mars (saison sèche). L'étude des fluctuations piézométriques sur l'ensemble des piézomètres (P1 à P6) indique que la variation du niveau de la nappe d'eau est influencée par les variations climatiques. De façon générale, une augmentation du niveau de l'eau est observée entre le mois de novembre et de juillet et une baisse entre le mois d'août et d'octobre. La remontée est donc proportionnelle à la période de sécheresse. Ainsi, la recharge du bassin de Kandi se fait en saison sèche, grâce aux eaux stagnantes et de ruissellement de la saison précédente qui s'infiltrent. La pluviométrie a donc une influence directe sur l'écoulement des eaux mais cet impact ne se remarque qu'en fin de saison. L'écart entre le temps de réponse dépend de la nature du substratum géologique. La réponse est plus rapide en zone de socle que sur du grès (Vissin, 2010).

La moyenne obtenue par piézomètre varie de 4 mm/an (P6) à 77 mm/an (P5). Au sein du bassin, la lame d'eau estimée par la méthode des fluctuations piézométriques indique que la recharge varie d'un point à un autre. Les valeurs les plus élevées sont obtenues au Sud et à l'Ouest du bassin. L'écoulement suit donc une orientation Sud-Nord. Ceci confirme la théorie selon laquelle les zones de bordure Sud, Ouest et Nord-Est du bassin correspondent à des zones de recharge de la nappe, tandis que la zone Nord bordant le fleuve Niger, correspond à la zone de décharge de celle-ci (Gbewezoun, 2017). Notons également qu'au niveau du piézomètre P5, situé sur du grès, nous avons une bonne recharge comparativement aux autres piézomètres à cause de sa position comme l'indique la carte géologique du bassin. Les capacités annuelles de recharge des aquifères de Kandi sont de 123 m^3/ha et 125 m^3/ha respectivement en zone du socle et en zone sédimentaire (DH 1998 in Vissin, 2010).

La recharge estimée par la méthode de Thornthwaite (Tableau XI) montre que la recharge est en moyenne de 742,6 mm/an tandis que la carte hydrogéologique du Bénin (Achidi et al., 2012) présentant les valeurs de la recharge estimées par la méthode de Thornthwaite montre que la recharge varie entre 150 et 250mm dans ce même bassin. Il résulte de ces deux résultats que la recharge a fortement augmenté au cours de ces dernières années. Ceci serait probablement dû à une importante régression des couvertures végétales qui jouent un grand rôle dans l'écoulement des eaux vers la nappe. La comparaison des différentes valeurs obtenues par les différentes méthodes permet également d'affirmer que la méthode de Thornthwaite surestime les valeurs.

L'analyse de l'évolution des valeurs de la recharge obtenues par la méthode de Thornthwaite associés à celles des pluies au cours des mois sous forme de courbe, de 2010 à 2020 indique que la recharge s'effectue au même moment que la période pluvieuse. Cette analyse semble contredire celle faite par la méthode des fluctuations piézométriques. Cette dernière stipule que la recharge au sein du bassin s'effectue au cours de la saison sèche. En effet, la méthode de Thornthwaite ne tient pas compte des apports extérieurs du milieu souterrain et du laps de temps que fait la quantité d'eau précipitée pour atteindre la nappe en fonction de sa formation géologique. On pourrait alors conclure que la méthode des fluctuations piézométriques serait adaptée à ce genre de milieu, si tous les paramètres sont disponibles pour l'étude.

Conclusion et perspectives

Au terme de ces travaux de recherche intitulé Variabilité temporelle des niveaux piézométriques des systèmes aquifères du bassin sédimentaire de Kandi, la période de recharge sur l'ensemble du bassin sédimentaire de Kandi a été identifiée. En effet, la recharge s'effectue sur une période allant du mois de novembre au mois de juillet. Cette dernière correspond à la période de sécheresse. L'estimation de la recharge faite à partir de la méthode des fluctuations piézométriques, a parmi de déduire que la recharge varie d'un point à un autre et qu'elle varie très peu au cours des années. Les résultats obtenus permettent donc d'affirmer que la recharge est comprise entre les valeurs de 4 mm/an et de 77 mm/an. Par la suite, nous avons obtenu par la méthode de Thornthwaite, une valeur de la recharge qui est en moyenne de 742,6 mm/an sur ce même bassin. Une période de recharge a été également identifiée et celle-ci correspond à la période pluvieuse.

Pour le bon déroulement de la réalisation de cette étude, les données piézométriques collectées proviennent de six piézomètres dont cinq installés dans le bassin sédimentaire de Kandi (P1, P2, P3, P4, P6) et le dernier dans un périmètre proche. Ces données ont été prises de façon journalière à l'aide des enregistreurs automatiques qui sont dans ces piézomètres. Lors des analyses, un énorme manque de ces dernières a été remarqué, cela sur des mois, voire des années entières. Suite à ce constat, pour la fiabilité des études similaires à venir, nous recommandons un suivi régulier et rigoureux de la prise des mesures piézométriques. Il est également nécessaire que d'autres piézomètres soient implantés afin que les études hydrologiques futures couvrent réellement l'ensemble du bassin. La porosité de drainage prise en compte pour l'évaluation de la recharge a été estimée par rapport aux études réalisées sur les différents réservoirs de notre zone d'étude rencontrés ailleurs. Ainsi, nous suggérons que des travaux soient réalisés notamment par la méthode de la résonnance magnétique des protons (RMP), afin qu'une valeur plus fiable de la porosité soit déterminée. En dehors de l'application de ces deux méthodes sur les dix années que nous avons faite, l'estimation de la recharge sur trente années pourrait permettre de comparer les résultats obtenus.

Références bibliographiques

Achidi, J., Bourguet, L., Elsaesser, R., Legier, A., Paulvé, E., Tribouillard, N. (2012). Notice explicative de la carte hydrogéologique du Bénin : carte du bassin sédimentaire de la Volta à l'échelle du 1/200 000. Rapport technique, GIZ Germany et DGEau, Cotonou, Benin, 39p.

Adam S, et Segla B, (1977), Carte topographique de la République Populaire du Bénin à l'échelle du 1/500 000e, Hatier, Paris, 1 carte,

AHOUNDE, A. Q., 2009. agritrop.cirad.fr; Analyse socio-économique des mesures d'adaptation des producteurs des communes de Banikoara et de Kandi face aux effets des variabilités et changements climatiques dans leurs systèmes de culture, [En ligne] Available at: https://agritrop.cirad.fr > doc…PDF Analyse socio-économique des mesures d'adaptation des … – Agritrop

Alidou, S., 1983. Etude géologique du basin paléo-mésozoïque de Kandi (Nord-Est du Bénin. Afrique de l'ouest), Thèse Doct. d'Etat,Univ. Nat. du Bénin et Univ. de Dijon, France. 328p.

Alidou, S. (1987). Etude géologique du bassin paléo-mésozoïque de Kandi, Nord-Est du Bénin (Afrique de l'Ouest), vol. 13. Publication occasionnelle CIFEG, Paris. 119 p.

Alidou, S., et Lang, J. (1978). Contribution à l'étude du sillon de Wèrè-Goungoun dans le bassin intracratonique mésozoïque de Kandi (Nord-Est de la République populaire du Bénin). 4è Réunion, Société Géologique Africaine, Université Ibadan, Nigéria.

Alidou, S., Lang, J. et Lemoigne, Y. (1979). Bois de structure gymnospermien provenant des formations du Bassin de Kandi (Continental intercalaire) dans le Nord-Est du Bénin. 7è réunion Sciences de la Terre, Lion, 4p.

Alidou, S., Lang, J., Bonvalot, J., Roman, E., et Seilacher A. (1991). Marine influences in the socalled continental sediments of the Paleozoic-Mesozoic Kandi Basin (Northern Benin – West Africa). Journal African Earth Sciences 12, 1/2, pp 55-65.

Alley WM & Leake SA (2004). The journey from safe yield to sustainability. Ground Water, 42(1):12–16. DOI:10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x.

Azontonde, H. A. (1991). Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (proceedings of the Niamey Workshop). IAHS Publ. No. 199, pp. 249-258.

BDI / & DG-Eau/DDMEE, 2020. api.ressources-eau.gouv.bj. [En ligne] Available at: https://api,ressources-eau.gouv.bj > ...PDF POINT DES REALISATIONS PAR COMMUNE [Accès le 03 Novembre 2022].

Boukari M., (2007). Hydrogéologie de la République du Bénin (Afrique de l'Ouest). Africa Geoscience Review Vol. 14 No. 3, pp. 303-328.

Devlin JF & Sophocleous M (2005). The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability. Hydrogeology Journal, 13(4):549–554. DOI:10.1007/s10040 004-0354-0.

Dimon, R., 2008. Adaptation aux changements climatiques : perceptions, savoirs locaux et stratégies d'adaptation dévellopées par les producteurs des communes de Kandi et de Banikoara, au nord du Bénin, Mémoire d'Ingénierie, 209 p.

Faure, H. (1966). Reconnaissance géologique des formations sédimentaires postPaléozoïques du Niger oriental. Editions du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, publication N°1, 630p.

Fortitou, 2022. WIKIPEDIA. [En ligne] Available at: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A9cial:History/Lame_d%27eau [Accès le 14 11 2022].

Gaye, M. K., 1992. Etude du comportement de la nappe en fonction de la pluviométrie sur un bassin versant représentatif. -bassin versant de Tougou-.

Greigert J. (1966). Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemmenden (Afrique Occidentale). BRGM, 234p.

Healy RW (2010). Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Houngbedji, B. A., 2016, Comportement hydrodynamique des nappes superficielles de la commune d'Abomey-Calavi,Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau/Laboratoire d'Hydrologie Appliquée.

Hountondji, B., de Paule Codo, F. & Aina, M. P., 2020. APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE A PARTIR D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE DANS LA

COMMUNE DE KANDI AU BENIN. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°41, Mars 2020, pp. 71-*89*, pp. 75-76.

Hubert, H. (1908). Mission scientifique au Dahomey, iris, lilliad, Université Lille1, 628p.

INSAE, 2015. RGPH4 *:* QUE RETENIR DES EFFECTIFS DE POPULATION EN 2013 ? Direction des Etudes Démographiques.

INSAE, 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (rgph-4, 2013).

Julien, F., 2006, Open Edition Journals. [En ligne] Available at: http://journals.openedition.org/vertigo/2402 ; DOI : https://doi.org/10.4000/vertigo.2402

Kamal, I. F. A., 2020. CARACTERISATIONS GEOLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES SEDIMENTS FERRUGINEUX DU CONTINENTAL TERMINAL DU BASSIN DE KANDI (NORD-EST BENIN), Niamey: Université ABDOU MOUMOUNI de Niamey (NIGER) et l'Université d'Abomey-Calavi (BENIN).

Konaté, M. (1996). Evolution tectono-sédimentaire du bassin Paléozoïque de Kandi (Nord Bénin-Sud Niger): Un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, vol 1, 290p.

Mairie de Kandi, 2011. Plan de Dévellopement Communal de Kandi.

Malundama, S. K., 2019. documentation.2ie-edu.org. [En ligne] Available at: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2891

Mazvimavi, D. & Maathuis, B., Consulté en Août 2022. *fr_chapitre_final_-_gestion_des_ressources_en_eau,pdf.* [En ligne] Available at: https://europa.eu/capacity4dev/file/16672/downl...

OBAMI-ONDON, H., 2020. HAL open science. [En ligne] Available at: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03049038/document

Orou Pete Alou, G. S., Gbewezoun, H. G. V., Alassane Zakari, A., Alassane, A., Lawin, A.

E., Mama, D., & Boukari, M. (2021). Caractérisation De L'aquifère Superficiel Du Bassin

Sédimentaire De Kandi (Nord-Est Bénin, Afrique Ouest): Nature Et Structure Du Reservoir,

Hydrodynamique. European Scientific Journal, ESJ, 17(3), 79. https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n3p79

ORSTOM, 1978. CARTE PEDOLOGIQUE DE RECONNAISSANCE de la République Populaire du Bénin à 1/200.000.

Pougnet, R. (1949). Stratigraphie et identification des formations continentales du Moyen Niger et du Haut Dahomey. Bulletin Société Géologique de France, vol 19, n°4, 5, 6, pp 493-498

Seilacher, A. and Alidou, S. (1988). Ordovician and Silurian trace fossils from Northern Benin (WAfrica). N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Stuttgart 7, pp 431-439.

Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J. L., et al. (2011). Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: the Donga basin (Benin, West Africa): inter-annual variability of water budget, Journal of Hydrology, 402:1–13.

SERHAU ou Service d'Etude et de Recherche pour l'Habitat et l'Urbanisme. (1992). Atlas cartographique de la région du Bénin. Rapport, MEHU, Cotonou, Bénin, 54p.

Sophocleous M & Devlin JF (2004). Comment on "The water budget myth revisited: why

hydrogeologists model." by J.D. Bredehoeft. Ground Water, 42(4):618.

Soro, D. D., 2017. Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé: cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE): Université Pierre et Marie-Curie Paris 6 (UPMC).

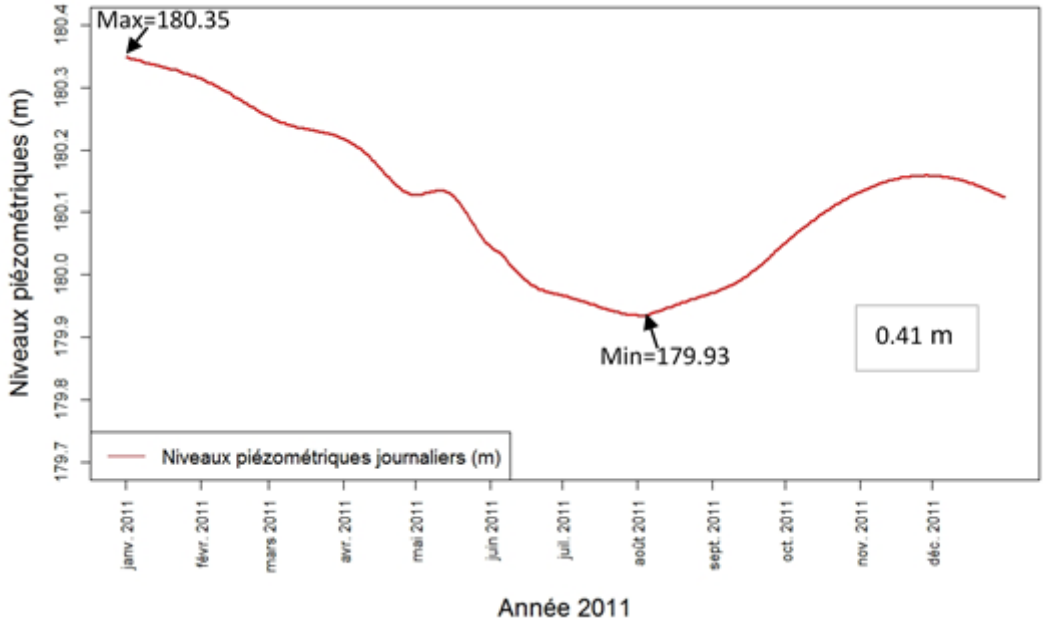
VIGUIER, B., 2016. HAL open science*;* Caractérisation des facteurs de contrôle de la recharge et des écoulements souterrains à différentes échelles de temps en zone de piedmont aride et hyper-aride : exemple de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal (Nord Chili).. [En ligne] Available at: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01689972/file/2016_VIGUIER_archivage.pdf

GBEWEZOUN Vinel, G. H. 2017. Caractérisation structurale et hydrodynamique de l'aquifère superficiel du bassin sédimentaire de Kandi (Nord-Est du Bénin), Abomey-Calavi: UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (INSTITUT NATIONAL DE L'EAU, DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU).

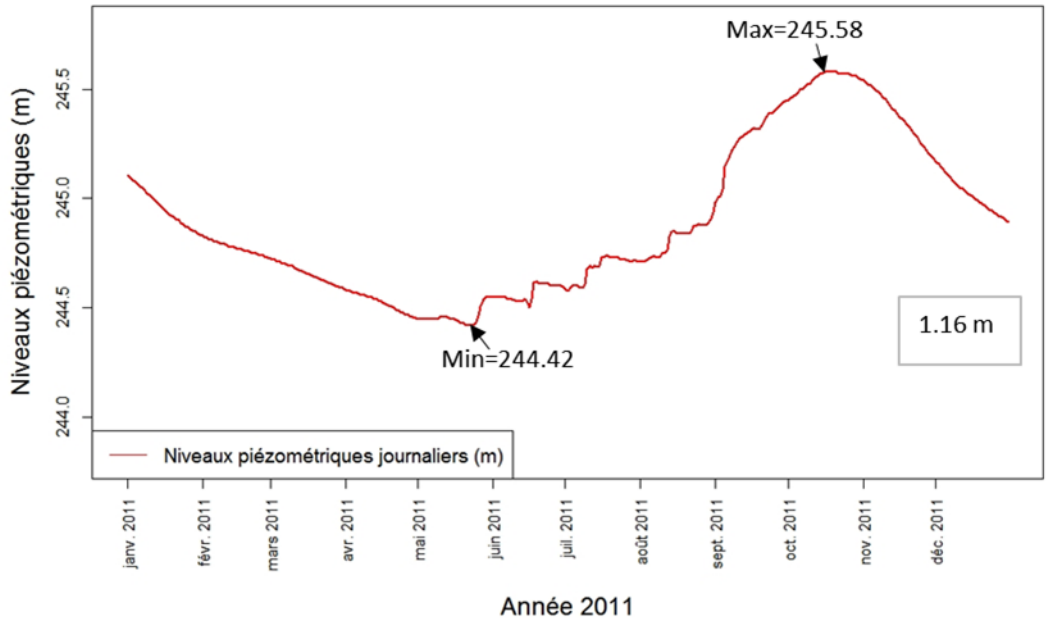
Vissin, E., 2010. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse en vue de l'optention du grade de Docteur de l'Université de Bourgogne.

Annexes

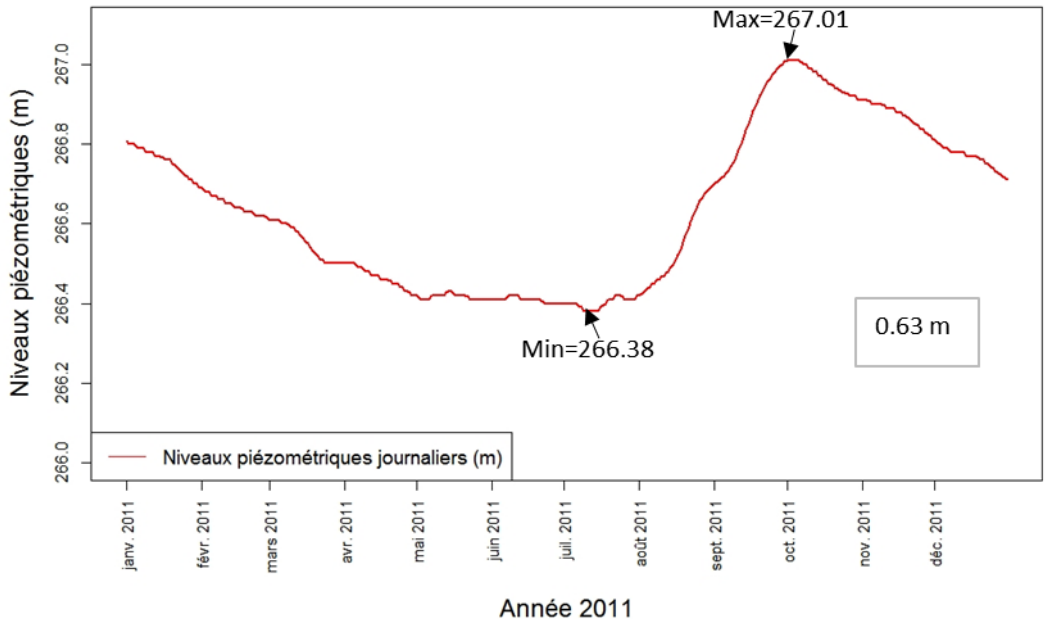
Annexe 1 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Malanville (P1)



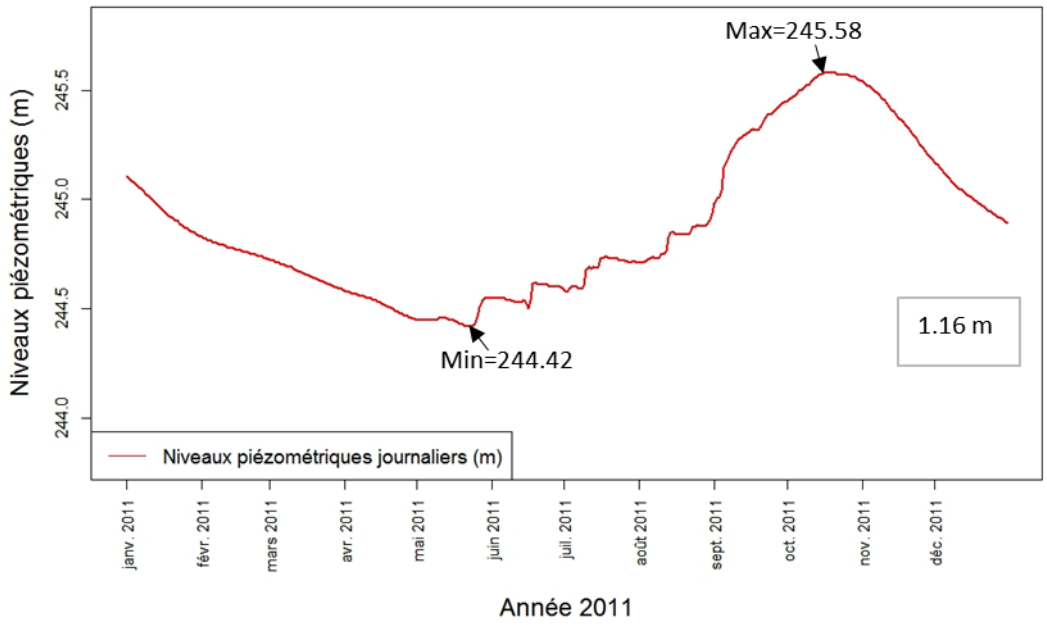
Annexe 2 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Gogounou (P2)



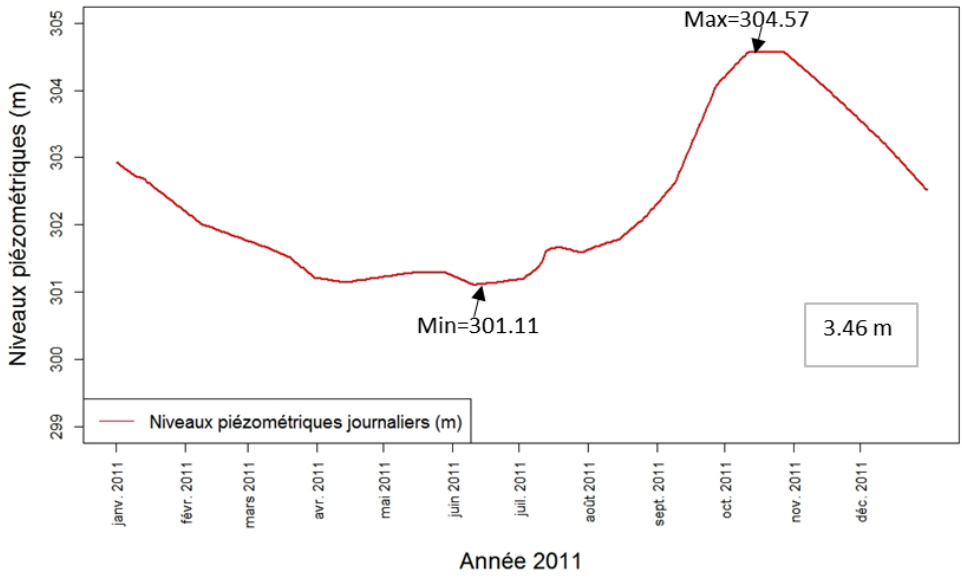
Annexe 3 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Ségbana (P3)



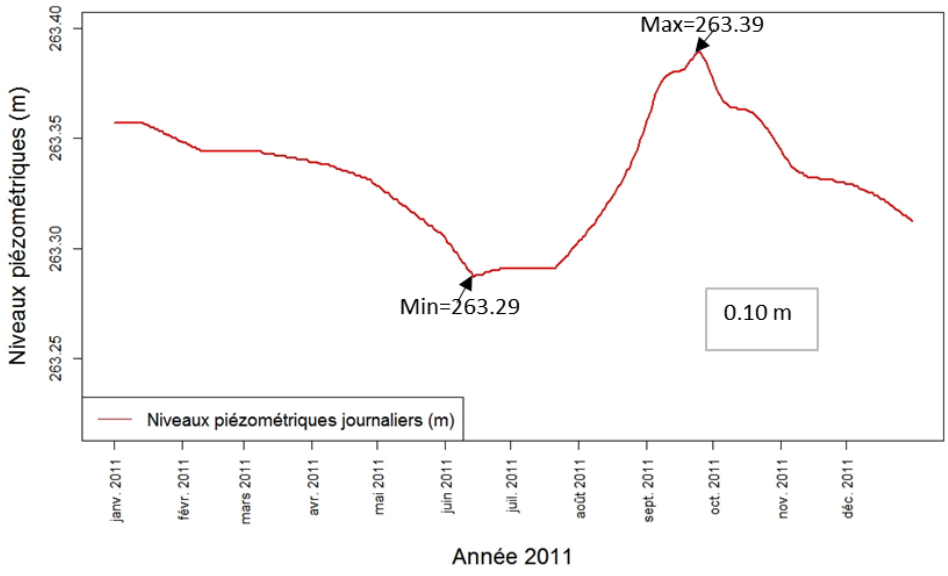
Annexe 4 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Ségbana (P4)



Annexe 5 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Kandi (P5)



Annexe 6 : Fluctuation des niveaux piézométriques en relation avec le temps (2011) à Kandi (P6)

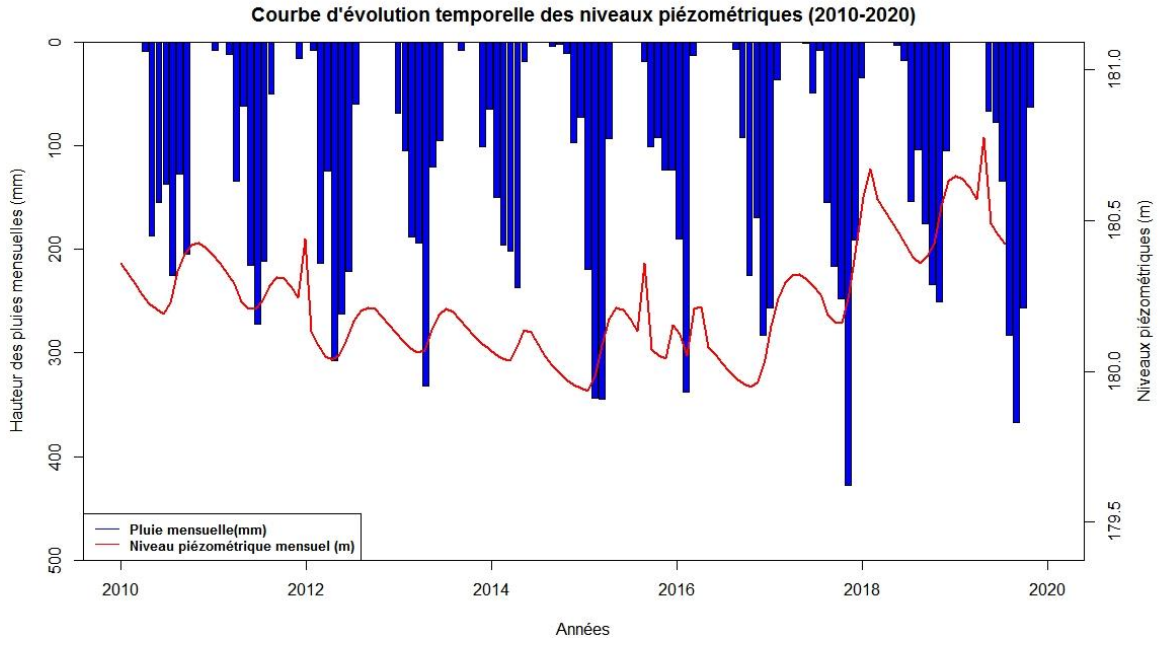


Annexe 7 : Coordonnées et altitudes des piézomètres utilisés

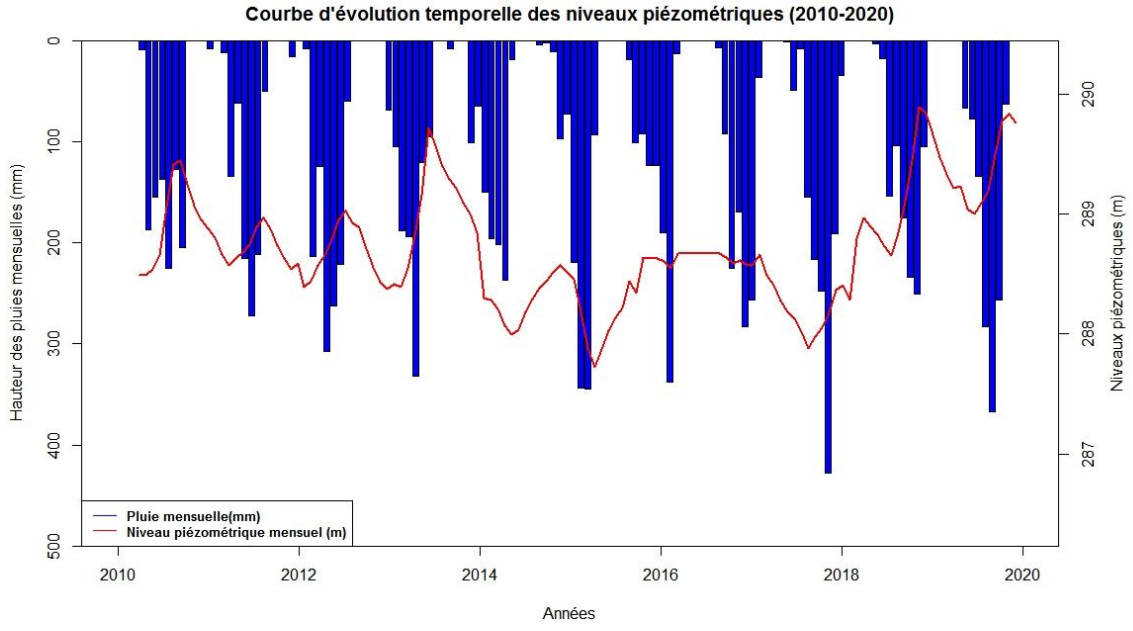
N° des piézomètres	Communes	X	Y	Altitudes
P1	Malanville	3,41	11,77	195
P2	Gogounou	2,99	10,74	295
P3	Ségbana	3,45	11,24	279

P4	Ségbana	3,64	10,96	255
P5	Kandi	2,84	11,11	308
P6	Kandi	3,08	11,04	279

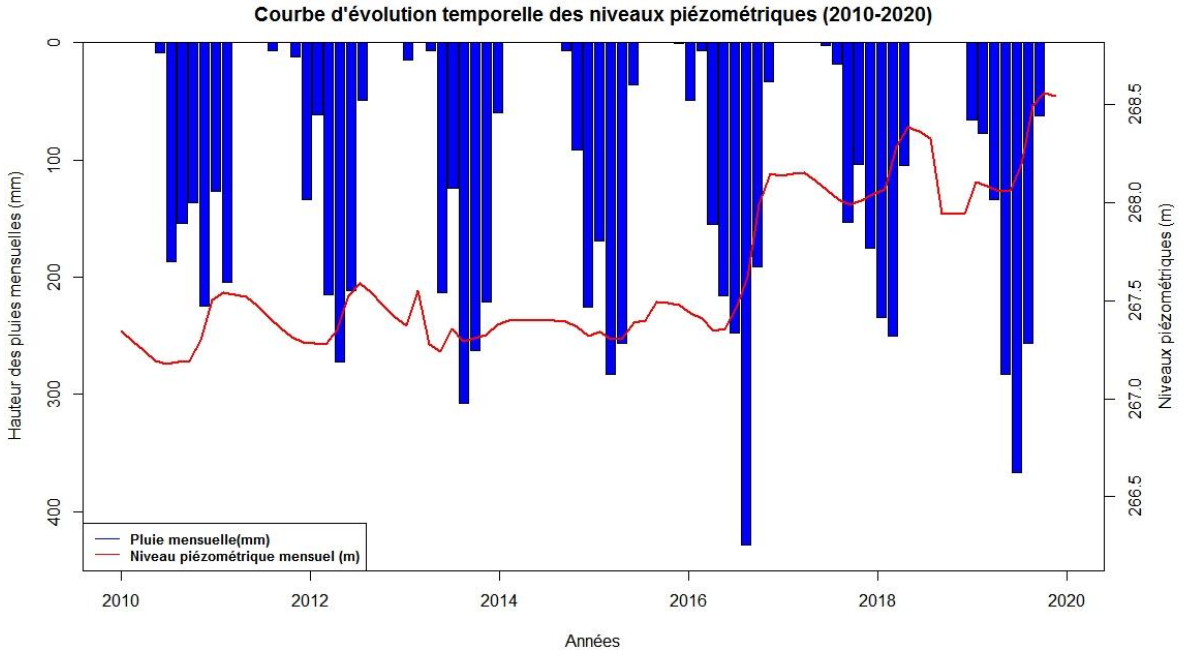
Annexe 8 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P1 à Malanville



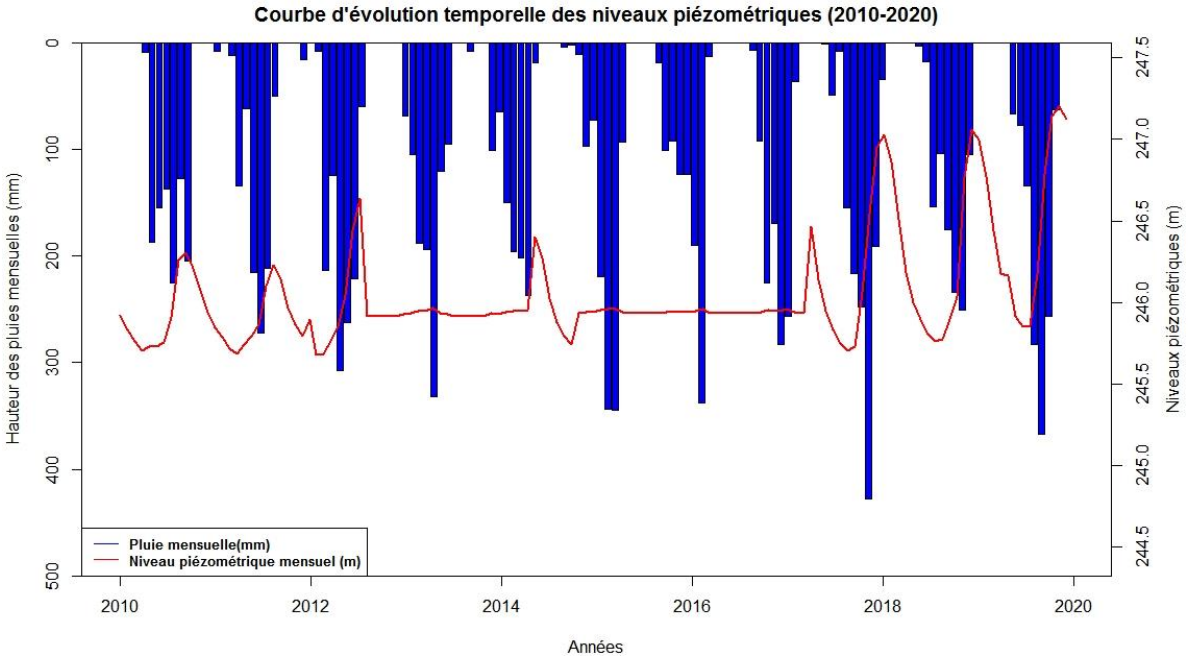
Annexe 9 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P2 à Gogounou



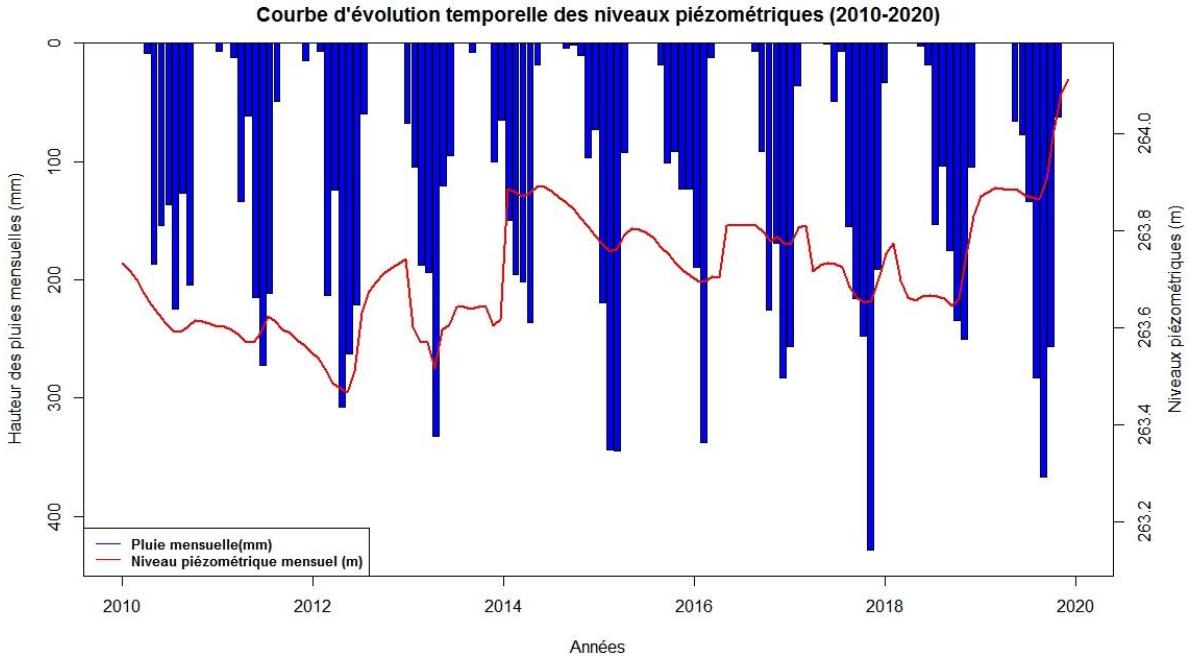
Annexe 10 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P3 à Ségbana



Annexe 11 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P4 à Ségbana



Annexe 12 : Courbe d'évolution temporelle des niveaux piézométriques en relation avec la pluviométrie du piézomètre P6 à Kandi



Annexe 13 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2010)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	73,4	76,5	103	81,1	69,4	51,5	42,1	41	45,2	56,9	69,3	90,8
P (mm)	0	0	0	8,3	187	154,5	136,7	224,7	127	204,7	0	0
ETR (mm)	0	0	0	8,3	69,4	51,5	42,1	41	45,2	56,9	69,3	30,7
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	30,7	0
Da (mm)	73,4	76,5	103	72,8	0	0	0	0	0	0	0	60,1
I (mm)	0	0	0	0	117,6	103	94,6	183,7	81,8	147,8	0	0

Annexe 14 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2011)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	111,5	97,4	140,2	137,6	103,5	84,7	57,9	46,9	39,1	51	60,9	96,4
P (mm)	0	7,4	0	12	134,1	61,9	215,2	272,3	211,4	49,4	0	0
ETR (mm)	0	7,4	0	12	103,5	84,7	57,9	46,9	39,1	51	60,9	37,5
RFU (mm)	0	0	0	0	100	77,2	100	100	100	98,4	37,5	0

Da (mm)	111,5	90	140,2	125,6	0	0	0	0	0	0	0	58,9
I (mm)	0	0	0	0	30,6	0	157,3	225,4	172,3	0	0	0

Annexe 15 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2012)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	65,2	66	117,6	114,3	78,6	51,3	39,7	40,8	45,1	54,4	61,7	91,8
P (mm)	0	15,2	0	7,3	212,9	124,4	307,5	262,7	220,9	59,5	0	0
ETR (mm)	0	15,2	0	7,3	78,6	51,3	39,7	40,8	45,1	54,4	61,7	38,3
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	38,3	0
Da (mm)	65,2	50,8	117,6	107	0	0	0	0	0	0	0	53,5
I (mm)	0	0	0	0	134,3	73,1	267,8	221,9	175,8	5,1	0	0

Annexe 16 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2013)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	79,5	81,8	112,1	88,3	78,1	56,2	48	38,5	44,3	59,9	79,9	92,1
P (mm)	0	0	0	68,1	104,7	188	193,7	332,2	120,3	95,2	0	0
ETR (mm)	0	0	0	68,1	78,1	56,2	48	38,5	44,3	59,9	79,9	20,1
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	20,1	0
Da (mm)	79,5	81,8	112,1	20,2	0	0	0	0	0	0	0	72
I (mm)	0	0	0	0	26,6	131,8	145,7	293,7	76	35,3	0	0

Annexe 17 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2014)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	107,2	121,7	132,2	112	80,1	68,1	56,9	44,7	42,5	62,7	83,9	103,7
P (mm)	7,7	0	0	100,6	64,8	149,9	195,3	201,5	236,5	18,8	0	0
ETR (mm)	7,7	0	0	100,6	64,8	68,1	56,9	44,7	42,5	62,7	56,1	0
RFU (mm)	0	0	0	0	0	100	100	100	100	56,1	0	0
Da (mm)	99,5	121,7	132,2	11,4	15,3	0	0	0	0	0	27,8	103,7
I (mm)	0	0	0	0	0	81,8	138,4	156,8	194	0	0	0

Annexe 18 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2015)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	108,7	108,3	128,5	144	109,3	85,5	54,3	39,1	43,8	55,4	78,4	105,6
P (mm)	0	4,1	1,9	10,5	96,6	72,8	219,5	344	344,2	92,6	0	0
ETR (mm)	0	4,1	1,9	10,5	96,6	72,8	54,3	39,1	43,8	55,4	78,4	21,6
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	21,6	0
Da (mm)	108,7	104,2	126,6	133,5	12,7	12,7	0	0	0	0	0	84
I (mm)	0	0	0	0	0	0	165,2	304,9	300,4	37,2	0	0

Annexe 19 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2016)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	100,3	100,1	107,1	102,1	99,1	60,5	52,1	42,6		64,3	75	94,8
P (mm)	0	0	18,5	101,2	92	123,2	123,1	189,5	337,3	12,2	0	0
ETR (mm)	0	0	18,5	101,2	92	60,5	52,1	42,6		64,3	47,9	0
RFU (mm)	0	0	0	0	0	100	100	100	100	47,9	0	0
Da (mm)	100,3	100,1	88,6	0,9	7,1	0	0	0	0	0	27,1	94,8
I (mm)	0	0	0	0	0	62,7	71	146,9	337,3	0	0	0

Annexe 20 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2017)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	87,7	112	134,9	115,4	90,9	54,7	47,3	40,3	41,8	56,1	70,2	73,2
P (mm)	0	0	0	7,1	91,8	225,4	169,1	282,8	256,5	36	0	0
ETR (mm)	0	0	0	7,1	90,9	54,7	47,3	40,3	41,8	56,1	70,2	9,7
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	79,9	9,7	0
Da (mm)	87,7	112	134,9	108,3	0	0	0	0	0	0	0	63,5
I (mm)	0	0	0	0	0,9	170,7	121,8	242,5	214,7	0	0	0

Annexe 21 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2018)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc

ETP (mm)	88,3	84,4	106,1	122,5	89,3	58,7	46,3	35,7	38,3	53,3	61,8	81,2
P (mm)	0	0,4	49,1	7,4	155,1	216,2	247,6	428,1	190,8	33,8	0	0
ETR (mm)	0	0,4	49,1	7,4	89,3	58,7	46,3	35,7	38,3	53,3	61,8	18,7
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	80,5	18,7	0
Da (mm)	88,3	84	57	115,1	0	0	0	0	0	0	0	62,5
I (mm)	0	0	0	0	65,8	157,5	201,3	392,4	152,5	0	0	0

Annexe 22 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2019)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	81,1	101,5	106,7	108,4	84,2	63,9	49,2	43,6	42,6	44,5	59,7	88,1
P (mm)	0	0	2,7	18	153,4	103,9	175,3	234,4	250,3	104,5	0	0
ETR (mm)	0	0	2,7	18	84,2	63,9	49,2	43,6	42,6	44,5	59,7	40,3
RFU (mm)	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	40,3	0
Da (mm)	81,1	101,5	104	90,4	0	0	0	0	0	0	0	47,8
I (mm)	0	0	0	0	69,2	40	126,1	190,8	207,7	60	0	0

Annexe 23 : Bilan estimé par la méthode de Thornthwaite (2020)

mois	janv	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc
ETP (mm)	92,6	112,1	97,8	96,7	83,5	50,2	50,7	45	44	56,5	78,4	99,2
P (mm)	0	0	0	66,1	77,4	133,7	283	366,9	256,8	62,4	0	0
ETR (mm)	0	0	0	66,1	77,4	50,2	50,7	45	44	56,5	78,4	21,6
RFU (mm)	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	21,6	0
Da (mm)	92,6	112,1	97,8	30,6	6,1	0	0	0	0	0	0	77,6
I (mm)	0	0	0	0	0	83,5	232,3	321,9	212,8	5,9	0	0

Table des matières

Dédicace i
Remerciements ii
Résumé iii
Abstract iv
Liste des sigles et abréviations v
Liste des tableaux vi
Liste des figures vii
Sommaire viii
Présentation de la structure d'accueil et activités menées ix
Introduction 1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE 3
1.1 Contexte géographique, humain, socio-économique et approvisionnement en eau potable. 3
1.2 Contexte hydrologique, hydroclimatique et végétation 7
1.3 Contextes géomorphologique et pédologique 8
1.4 Contexte géologique 10
1.5 Contexte hydrogéologique 15
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES 17
2.1 Matériels de travail 17
2.2 Méthodologie d'étude 17
2.2.1 Recherche documentaire 17
2.2.2 Collecte des données 17
2.2.3 Traitement des données recueillies 18
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION 22
3.1 Résultats 22
3.1.1 Détermination de la recharge 22
3.1.1.1 Méthode des fluctuations piézométriques 22
3.1.1.2 Méthode du bilan hydrique 32

3.2 Discussion 33

Conclusion et perspectives 36

Références bibliographiques 37

Annexes 42

Table des matières 51