

# *Evaluation de la Recharge des Eaux Souterraines Profonde de l'Aquifère du Paleocene Superieure dans le Bassin du Mono-Couffo au Benin*

KOUDJEGA K. Hervé<sup>1</sup>, KODJA D. Japhet<sup>2</sup>, VISSIN W. Expédit<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou 01 ;  
Tél : 94 87 33 30 ; E-mail : koudjegaherve@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Université d'Abomey-Calavi 01 BP  
526, Cotonou 01 ; E-mail : japhdom@gmail.com

<sup>3</sup> Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Université d'Abomey-Calavi 01 BP  
526, Cotonou 01 ; E-mail : exlaure@yahoo.fr



**Résumé** - L'estimation de la recharge est essentielle pour la bonne gestion et la protection des ressources en eaux souterraines. Les taux de recharge peuvent varier dans le temps et l'espace sur plusieurs ordres de grandeur selon le climat, la géologie, l'hydrologie, la topographie, la couverture végétale et un ensemble de facteurs anthropiques. Or, chaque méthode permet d'estimer la recharge à l'intérieur d'une plage de valeurs limitée, avec des échelles d'applications spatiales et temporelles qui varient énormément d'une méthode à l'autre. Cette étude vise à évaluer la recharge afin de caractériser les variations de la nappe en fonction du climat et de la lithologie de la zone d'étude. Pour atteindre cet objectif, cette étude s'est appuyée sur deux grands types de données : météorologiques (pluie, température, humidité relative, évapotranspiration potentielle, évapotranspiration réelle) et hydrologiques (chroniques piézométriques). L'étude s'est appesanti sur l'estimation de la recharge par différent méthode, à savoir la méthode de fluctuation piézométrique et la méthode de bilan de masse. Pour la méthode de fluctuation piézométrique, la valeur de la recharge trouvée pour chaque station est proportionnelle à la pluviométrie mensuelle enregistré et témoigne de l'influence de la variation des hauteurs pluviométriques sur la nappe. La valeur de recharge la plus importante à Athiéme et à Bopa est observée au mois d'Octobre alors que le mois de Septembre constitue le mois le plus pluvieux (322.2 mm) pour Bopa et (260.2 mm). L'estimation de la recharge par la méthode de bilan hydrique montre que des quatre stations, seul deux stations ont pu obtenir une recharge significative pour une valeur variant suivant la saison : en Juin 2010 on a une recharge de 140mm et une recharge de 192mm en Juillet 2017 pour la station de Lokossa et une recharge est de 129,8mm en Septembre 2010 pour la station de Bopa. Cette méthode montre que la recharge de la nappe varie en fonction des années et des zones d'étude et de la lithologie d sol.

**Mots clés** – Recharge, Eaux souterraines, Aquifère du Paléocène supérieure, Mono-Couffo, Piézométrie.

**Abstract**— Estimating recharge is essential for good management and protection of groundwater resources. Recharge rates can vary over time and space over several orders of magnitude depending on climate, geology, hydrology, topography, vegetation cover and a range of anthropogenic factors. Or, each method estimates the recharge within a limited range of values, with spatial and temporal application scales that vary greatly from one method to another. This study aims to assess recharge in order to characterize the variations in the water table as a function of the climate and the lithology of the study area. To achieve this objective, this study is based on two main types of data: map (rain, temperature, relative humidity, potential evapotranspiration, actual evapotranspiration) and hydrological (piezometric chronicles). The study focused on the estimation of recharge by a different method, namely the piezometric fluctuation method and the mass balance method. For the piezometric fluctuation method, the recharge value found for each station is proportional to the monthly rainfall recorded and reflects the variation in rainfall depths on the water table. The highest recharge value in Athiéme and Bopa is observed in October, while September is the rainiest month (322.2 mm) for Bopa and (260.2 mm). The estimation of recharge using the water balance method shows that of the four stations, only two stations were able to obtain significant recharge for a variant value depending on the season: in June 2010 on a 140mm recharge and a 192mm recharge July 2017 for the

Lokossa station and a recharge is 129.8 mm in September 2010 for the Bopa station. This method shows that the recharge of the water table varies according to the years and the study areas and the lithology of the soil.

Keywords- Recharge, Groundwater, Upper Paleocene Aquifer, Mono-Couffo, Piezometry.

### I. INTRODUCTION

Dans la zone intertropicales, les processus de la recharge des aquifères sont hétérogènes et variables dans l'espace et dans le temps. Cette hétérogénéité est liée à la forte variabilité des paramètres hydrologiques (pluviométrie, ruissellement et infiltration) [1]. L'anthropisation des milieux naturels modifie profondément la recharge des aquifères. En effet, au Bénin, l'urbanisation rapide et mal contrôlée de l'espace entraîne une imperméabilisation du sol et par conséquent une diminution de la recharge[2]. Même si la variabilité pluviométrique n'est pas le seul paramètre de la recharge des aquifères, surtout à nappe libre, elle est un élément clé (en interaction avec la température et l'évaporation) de la variation spatio-temporelle des ressources en eaux souterraines [3]. La recharge est un processus qui fait partie du cycle de l'eau et est équivalente de ce fait à la partie ou quantité des précipitations qui s'infiltrent et devient de l'eau souterraine. Elle peut être considérée de façon pratique, comme étant la quantité d'eau issue des apports naturels partant de la surface et ayant échappé à la reprise évaporatoire, qui percole à travers la zone non saturée et alimente l'aquifère. Les modalités de recharge sont en principe fonction des zones climatiques et des types d'aquifères [4]. Les aquifères à nappes libres et les zone d'affleurement sont naturellement les premiers à recevoir les eaux de pluies et la recharge. Les aquifères semi-captifs et captifs quant à eux connaissent soit une recharge verticale par des phénomènes de drainance, soit une recharge latérale à travers les zones d'alimentation depuis les zones préférentielles de recharge[1]. Les travaux de [5] ont permis de comprendre que le renouvellement des eaux souterraines dépend de la recharge qui est fonction de la pluie et de l'évapotranspiration. [6], expliquent qu'une augmentation de l'évaporation et de l'évapotranspiration suite à l'accroissement des températures entraînerait une diminution de la recharge des aquifères et aurait des effets directs sur le niveau et la qualité des nappes.

La problématique d'Approvisionnement en Eau Potable des populations situé dans la depression de la Lama, zone d'affleurement du Paléocène Supérieure, se posant encore avec acuité, la quantification des flux entrants et sortants dans ces différents aquifères est à la base de la gestion durable de la ressource à toutes les échelles. Cette étude a pour but d'évaluer la recharge des eaux souterraines de l'aquifère du Paléocène supérieure à l'aide de la méthodes piézométrique et de la méthode de bilan de masse couple avec des modèle mathématique afin de caractériser les variations de la nappe en fonction du climat et de la lithologie de la zone d'étude.

Le secteur d'étude qui est la zone d'Affleurement du Paléocène Supérieure, se situe dans la dépression des Tchi. Il est une partie du secteur occidental de la grande dépression médiane qui traverse le bassin sédimentaire du Sud-Bénin

d'Est en Ouest, dite dépression de la Lama. Couvrant les départements du Mono et du Couffo, la dépression des Tchi est située entre le plateau Adja au Nord, celui de Comè au Sud et les terres exondées d'Agamè à l'Ouest. Elle est comprise entre 6°52' latitude Nord, 6°37' latitude Sud, 1°58' longitude est, 1°50' longitude Ouest (Figure 1). La zone se décompose en une dépression principale à l'Ouest, le long du cours inférieur du fleuve Couffo et en un certain nombre de petites dépressions lacustres. Cet ensemble représente environ 15% de la superficie des départements du Mono et du Couffo. Les communes de Bopa , de Houéyogbé, de Lokossa, de Dogbo et de Lalo dans les Départements du Mono et du Couffo s'inscrivent pour une bonne partie dans cette dépression. Elle couvre une superficie d'environ 477 km [7].

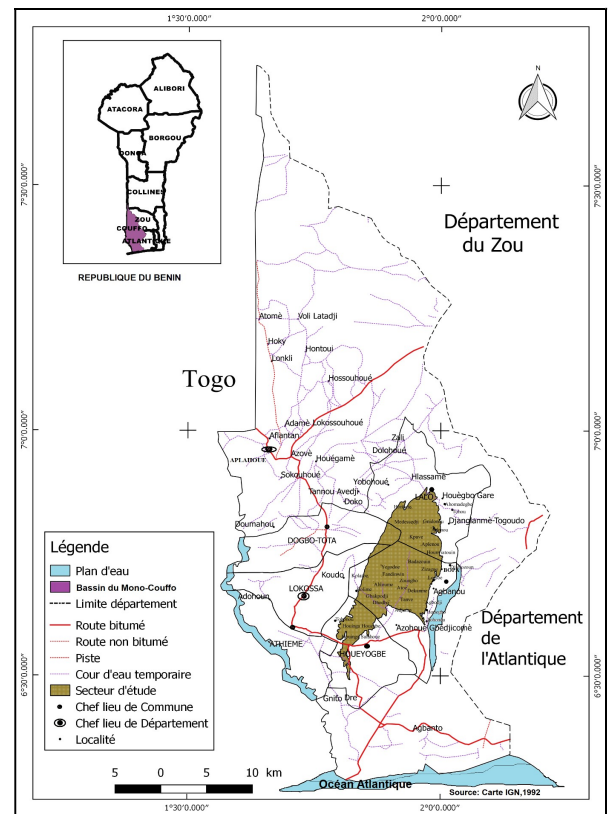


Figure 1 : Carte montrant la zone d'Affleurement du Paléocène supérieure dans le bassin du Mono-Couffo

D'après [8] relative au bassin sédimentaire cœtière du Bénin, ce Bassin comporte deux aquifère principaux : le Continentale terminale et le Crétacé auxquels s'ajoutent l'aquifère quaternaire et celui du Paléocène.

l'aquifère des calcaires Eo-paléocène est à nappe captive sous les argilites et marnes de paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen. Il est parfois affleurant ou

subaffleurant à l'intérieur de la dépression de la Lama, puis s'approfondit très rapidement vers le Sud (Figure 2) ;

- l'aquifère du continental terminal, localisé au niveau des plateaux sud du bassin côtier, est assez complexe et généralement à nappe libre. Il est caractérisé par des niveaux statiques faibles au Sud et dans les zones de bordures des plateaux ;

- l'aquifère du Quaternaire représenté par les aquifères des sables littoraux, d'une part et ceux des sables alluviaux, d'autre part, les aquifères quaternaires sont d'extension spatiale limitée. Leurs épaisseurs sont de l'ordre de 20 m au maximum [8];

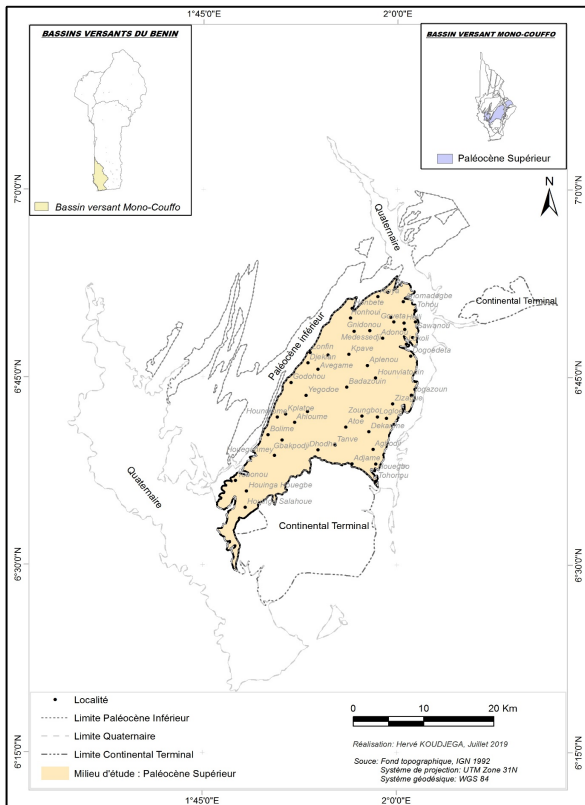


Figure 2: Carte hydrogéologique montrant le paléocène supérieure

Le captage de l'aquifère du Paléocène pourrait s'avérer économiquement intéressant pour l'alimentation en eau potable dans les zones basses où sa cote piézométrique s'établit au-dessus de la cote du sol, favorisant ainsi le caractère jaillissant des forages [9]. Il s'agit des zones lacustres de l'Atlantique et de l'Ouémé, du "lac" Ahémé, de la basse vallée du Mono et de l'Ouémé. Ailleurs, les calcaires et sables paléocènes sont, soit trop profonds (plus de 400 m, cas des plateaux), soit dénoyés (cas de la dépression de Lama)[8].

Ces aquifères sont séparés l'un de l'autre par des couches argileuses ou marneuses comme l'illustre la figure 3.

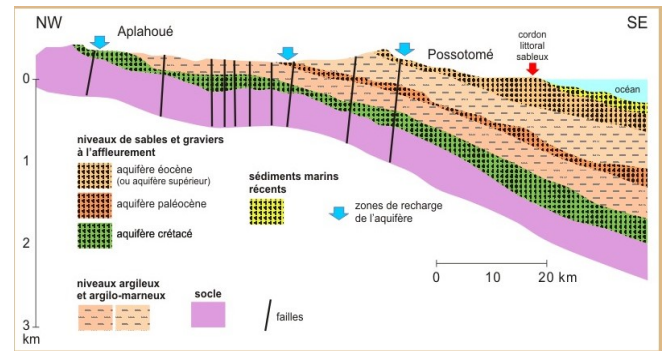


Figure 3 : Coupe hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin selon les directions nord-ouest et sud-est (Aplahoué-Ouidah) Source : [8, 10]

La coupe hydrogéologique du bassin met en évidence la zone de recharge des aquifères du crétacé et du paléocène. La constitution des faciès montre la présence du calcaire dans la zone d'affleurement du Paléocène. Cette facette hydrogéologique régissant les processus d'infiltration. Ainsi, le recouvrement superficiel, à grande échelle des couches lithologiques calcaire et marneuses, accélère sous l'effet de la pente, le ruissellement et l'infiltration des eaux pluviales. Ils présentent des caractéristiques et propriétés hydrodynamiques variées, très détaillées dans les travaux hydrogéologiques faits sur le bassin [8]. Les caractéristiques ci-après présentées sont inspirées de [8, 11].

## II. DONNEES ET METHODE

### A. DONNEES

Les données de cette étude sont composées de données climatiques, des données piézométriques et des données cartographiques.

les chroniques climatiques utilisées dans le cadre de la présente étude sont : les hauteurs de pluie (journalière, mensuelle et annuelle) des stations pluviométriques situées sur le bassin ou dans les environnements immédiats sur la période allant de 1957 à 2017, les données d'évapotranspiration potentielle, de températures maximales et minimales (journalière) issues de la seule station synoptique de Cotonou de la période (1957-2017). Les chroniques hebdomadaires des piézomètres de Dogbo, de Athiémé, de Bopa et de Lokossa situés dans et autour du bassin du Mono-Couffo, relevées par la DG-Eau, ainsi que les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin côtier ont constitué l'essentiel des données hydrogéologiques. Les fluctuations des niveaux piézométriques couvrant la période de 2009 à 2013 pour la commune de Athiémé dans l'arrondissement de Kpinnou, de 2011 à 2016 pour la commune de Dogbo dans l'arrondissement de Madrè, de 2009 à 2013 pour la Commune de Bopa dans l'arrondissement de Badazouin et de 2011 à 2013 dans la Commune de Lokossa dans l'arrondissement de Fongba ont principalement aidé à comprendre l'influence de l'évolution climatique sur l'hydrodynamique de l'aquifère du Paléocène supérieure. Les

données auxiliaires utilisées sont géologiques, lithologiques et topographiques dans la mesure où elles conditionnent la fonction de transfert hydrique atmosphère-sol-aquifère et celle de stockage des réservoirs souterrains.

**B. METHODE**

Deux méthodes ont été utilisées pour le calcul de la recharge dans la zone d’affleurement du Paléocène supérieure : la méthode de fluctuation piézométrique et du bilan hydrique.

*1) Méthode des fluctuations piézométriques ou Water-Table Fluctuation (WTF) method:*

La méthode WTF est basée sur le principe que toute remontée du niveau piézométrique, dans les aquifères à nappe libre et superficielle, est due à un apport additionnel d’eau [12]. Cette recharge, bien qu’attribué à l’infiltration verticale des eaux pluviales, peut aussi provenir de la drainance verticale à partir d’un autre système aquifère sous-jacent. Cette méthode de dynamique du toit de la nappe sert à évaluer la recharge des aquifères par analyse des fluctuations de niveau d’eau dans des puits, les forages et les piézomètres. L’équation de la recharge s’écrit.

$$R(t_j) = S_y * \Delta H(t_j)$$

où  $R(t_j)$  (cm ou m) est la recharge enregistrée entre les temps  $t_0$  et  $t_j$ ,  $S_y$  la porosité efficace ou totale pour les aquifères à nappe libre et coefficient d’emmagasinement pour les aquifères confinés ou à nappe captive et  $\Delta H(t_j)$  en cm ou en m est la charge hydraulique pendant la période de recharge.  $\Delta H(t_j)$  est estimée par deux méthodes. L’approche graphique consiste en une extrapolation manuelle de la récession antécédente  $h_0$  à la base du niveau piézométrique optimal  $h_j$ . Ainsi,  $\Delta H(t_j)$  correspond à la différence entre les niveaux piézométriques  $h(t_j)$  et  $h(t_0)$  extrapolé (figure 4).

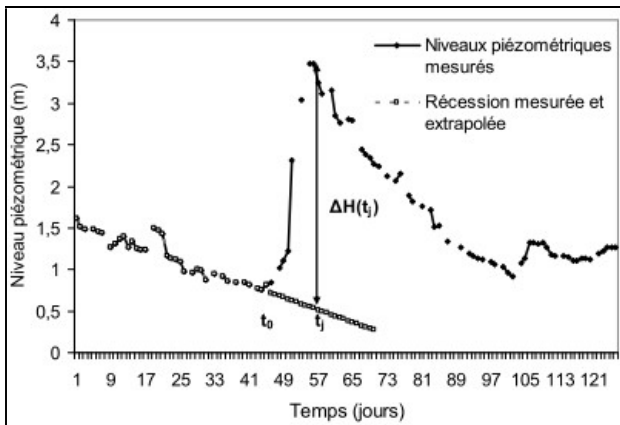


Figure 4 : Méthode graphique de détermination de la charge hydraulique

La méthode statistique de la courbe principale de récession [13], elle consiste en une procédure automatique de calcul de  $\Delta H(t_j)$  à partir des fluctuations journalières de niveau piézométrique.

La méthode WTF, en raison de sa simplicité, de sa facilité d’utilisation, de la disponibilité des données piézométriques et de son application à n’importe quel puits ou forage peu profond, a été adaptée à plusieurs études [ 4, 14, 15, 16, 17, 18]. Elle n'exige aucune prétention sur les mécanismes de flux d'eau dans la zone non saturée et par conséquent, la présence des chemins préférentiels d'écoulement ne limite pas son utilisation. Mais, [15] estiment que cette approche est une simplification brute d'un phénomène très complexe, à savoir, le mouvement de l'eau vers et de l'aquifère. Dans le bassin du Mono-Couffo, cette complexité est fonction de la dynamique de l'utilisation des terres, fortement influencés par l'occupation humaine et ses corollaires.

La méthode WTF est appliquée dans cette étude aux données piézométriques de Bopa, de Lokossa, de Athiéme et de Dogbo. Le bassin du Mono-Couffo présente une composition lithologique très variée de la plaine côtière aux plateaux. A cet effet, les valeurs de la  $S_y$ , correspondant à la porosité utile [4], effective ou coefficient de drainage [19] ou efficace sont choisies en se basant sur les travaux de [8, 11, 17, 19]. Dans le tableau I une synthèse de 17 études menées sur la porosité utile, déterminée par différentes techniques.

Tableau I : Synthèse statistique de 17 études sur la porosité utile

Texture	Porosité efficace moyenne	Coefficient de variation (%)	Porosité efficace minimum	Porosité efficace maximum	Nombre de détermination
Argile	0,02	59	0,00	0,05	15
Limón	0,08	60	0,03	0,19	16
Sable argileux	0,07	44	0,03	0,12	12
Sable fin	0,21	32	0,10	0,28	17
Sable moyen	0,26	18	0,15	0,32	17
Sable grossier	0,27	18	0,20	0,35	17
Sable graveleux	0,25	21	0,20	0,35	15
Gravier fin	0,25	18	0,21	0,35	17
Gravier moyen	0,23	14	0,13	0,26	14
Gravier grossier	0,22	20	0,12	0,26	13

Source : Johnson, 1967, cité par Healy et Cook, 2002

Au regard des valeurs de texture présentées dans ce tableau, les porosités effectives  $S_y$  considérées pour l’étude sur le bassin sédimentaire côtier du Bénin sont égales à 0,26 (texture sable moyen) pour la plaine littorale et 0,07 (texture sablo-argileuse) pour le plateau d’Allada. Les piézomètres choisis sont supposés permettre d’avoir une idée du fonctionnement hydroclimatique souterrain des aquifères captant le Paléocène supérieure. Mais, le système de pompage intensif risque d’influencer la variation de la charge hydraulique et de plus le réseau piézométrique ne couvre pas toute la région d’étude.

*1) Méthode du bilan hydrique*

La méthode du bilan hydrique permet de calculer une valeur de recharge, à l’échelle d’une parcelle ou d’un bassin versant si les paramètres sont bien connus. Elle part du principe que la pluie tombée sur le bassin se répartit entre l’évapotranspiration réelle, le ruissellement, l’infiltration et la variation du stock d’eau dans le sol. Elle se traduit par l’équation du bilan qui s’écrit pour un intervalle de temps :

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

P = Précipitation ;

ETR = Évapotranspiration réelle ;

R = Ruissellement ;

I = Infiltration directe ;

$\Delta S$  = Variation de stock d'humidité du sol

L'estimation de ces paramètres du bilan hydrique n'est pas aisée. Ces données ont été utilisées pour le calcul du bilan hydrique à partir de la macro ESPERE 5 développée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières [21], avec comme données d'entrées les précipitations journalières, la température journalière et l'évapotranspiration journalière. La principale difficulté pour cette méthode réside dans l'estimation de l'Évapotranspiration Réelle (ETR). Elle influence fortement l'infiltration du fait qu'elle peut être très grande dans notre contexte de zone intertropicale et son calcul fait intervenir un grand nombre de paramètres qui ne sont pas souvent disponibles. Elle est souvent estimée à partir de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) définie comme la limite maximale que peut atteindre l'ETR. La formule empirique préconisée est celle par la FAO de Penman-Monteith [22], généralement utiliser pour calculer l'ETP.

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

L'hydrodynamique du système aquifère du bassin du Mono-Couffo est étudiée à travers l'estimation de la recharge basée sur les données hydrologiques et climatologiques. De plus, l'identification des facteurs naturels et ou anthropiques, qui influencent la réalimentation ou la qualité des eaux souterraines a contribué à évaluer la vulnérabilité de la ressource dans un contexte de changement environnemental dans le bassin.

#### A. Estimation de la recharge par la méthode de Fluctuation piézométrique

Les fluctuations journalières ont été suivies au moyen de sondes automatiques installées dans les piézomètres de Badazoui, de Gativé, de Athiémé et de Lokossa. Les données piézométriques interprétées dans ce paragraphe sont des mesures saisonnières. Les mesures effectuées pendant la période de basse eau et au cours de la période de haute eau Ils sont répartis dans l'aquifère du Paléocène (calcaire et sable). Ces données ont été corrélées avec la pluviométrie moyenne journalière (figure 5, 6, 7 et 8). Les mesures effectuées montrent que les hauteurs des fluctuations des niveaux des nappes varient en fonction des saisons et de l'année. Dans la zone d'étude, les mesures des niveaux statiques ont été faites de 2009 à 2013 pour la commune de Athiémé dans l'arrondissement de Kpinnou, de 2011 à 2016 pour la commune de Dogbo dans l'arrondissement de Madré, de 2009 à 2013 pour la Commune de Bopa dans l'arrondissement de Badazouin et de 2011 à 2013 dans la Commune de Lokossa dans l'arrondissement de Fongba. On observe un cycle saisonnier régulier à Athiémé de 2009 à

2013 (figure 5) dont l'amplitude maximale est de l'ordre de 12 mètre. De même on observe également un cycle saisonnier régulier à Dogbo de 2011-2016 (figure 6), à Bopa de 2009 à 2012 et à Lokossa de 2011 à 2013 dont les amplitudes maximales respective sont de l'ordre de 1,5 mètre, 17,8 mètres et 45,4 mètres sur les observations des niveaux piézométriques de la nappe captant le Paléocène dans les quatres communes. Les figures (5,6,7et 8) dressés à partir de ces mesures permettent de faire les observations suivantes :

Lors des premiers évènements pluvieux, on observe une augmentation du niveau de la nappe en fonction de l'intensité des pluies. Cette réponse rapide aux impulsions pluviométriques de la nappe peut être consécutive aux caractéristiques hydrodynamiques dans le bassin, à l'influence de la topographie et à l'absence de réseaux de [11]. A la fin de la saison pluvieuse, une tendance à la baisse du niveau de la nappe est observée. Ce scénario est noté au niveau de tous les piézomètres avec des réponses de la nappe qui diffèrent en fonction de la localisation de l'observatoire. En effet, au niveau du piézomètre de Athiémé, le niveau piézométrique avoisine les 10,5 m en saison sèche. Une réponse rapide de la nappe est observée avec les premières pluies. L'écoulement verticale (recharge) est plus prépondérant que l'écoulement latéral pendant la saison des pluies à ce niveau, ce qui a pour effet de maintenir l'amplitude à 12 m jusqu'à la fin de la saison pluvieuse. Ce qui est de même pour les piézomètre des communes de Dogbo et de Lokossa dont les amplitude passe respectivement de 0,5m à 1m et de 44 m à 45,4 m. Par contre, au de la Commune de Bopa ou il est observé une chute d'années en années, le niveau piézométrique avoisine 17,5 m en période de saison pluvieuse et 16m en période de saison sèche; la récession, plus rapide en saison sèche, témoignent de l'écoulement latéral qui prédomine.

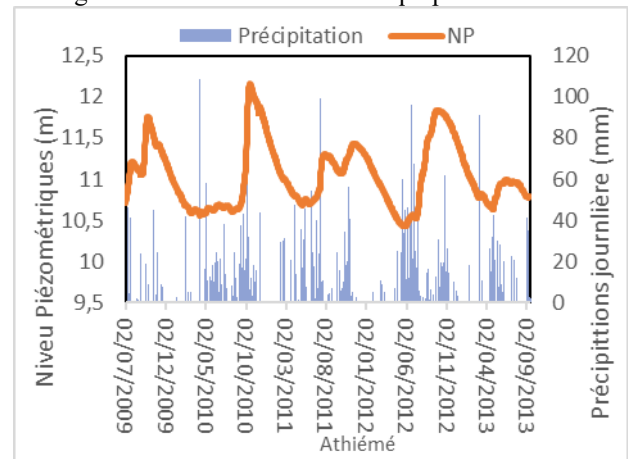


Figure 5: Evolution journalière de la piézométrie à Athiémé

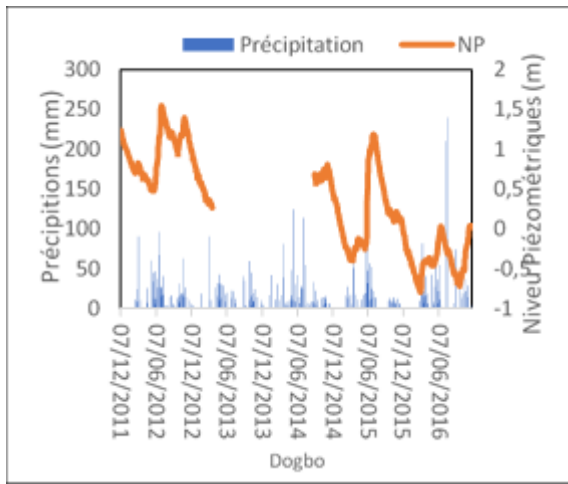


Figure 6: Evolution journalière de la piézométrie à Dogbo,

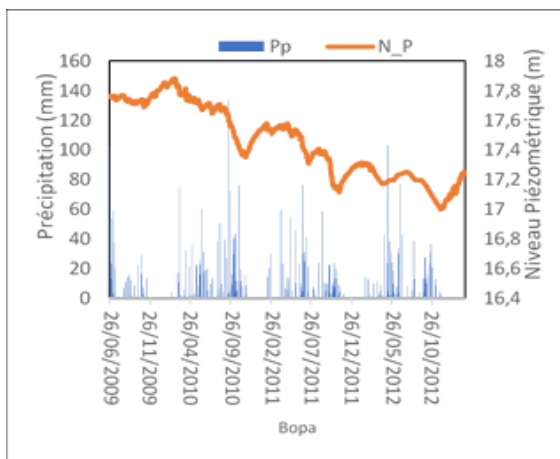


Figure 7: Evolution journalière de la piézométrie à Bopa

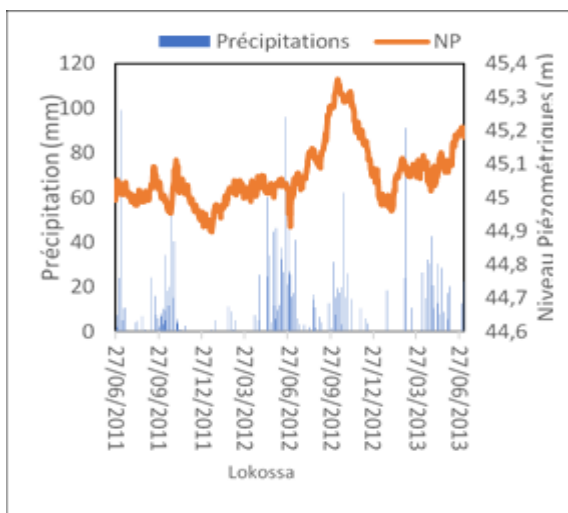


Figure 8: Evolution journalière de la piézométrie à Lokossa

Le suivi mensuel des piézomètres du mois de septembre au mois de mars a porté les niveaux piézométriques à fort

amplitude et cela commencent à s'abaisser à partir du mois d'août pour atteindre le niveau le plus bas en novembre ou décembre. Cette observation corrobore celle relevée par certains auteurs [4, 17] dans le bassin sédimentaire côtier. Ces figures expliquent l'abaissement peu sensible de la nappe entre août et décembre, par la présence d'eau accumulée dans les profils de sols et dans la zone non saturée au cours des saisons pluvieuses. Par contre, pendant la période d'octobre à avril principalement (grande saison sèche), les niveaux piézométriques commencent à s'élever et les pluies de la grande saison pluvieuse (mars à juillet), renforcent leur remontée jusqu'en juillet voire août. La récession piézométrique continue pendant la grande saison sèche jusqu'au début de la grande saison pluvieuse 2 à 3 mois après les premières pluies. Ce constat est aussi fait par [4] qui montrait que la remontée des niveaux ne se fait pas concomitamment avec le retour de la pluie. L'effet des précipitations sur les variations piézométriques peut se manifester au bout de plusieurs mois, si les valeurs de piézométrie sur un nombre d'ouvrages significatifs permettent une bonne représentativité en considérant l'effet topographique, des relations eau de surface-eaux souterraines. Aussi faudrait-il que les variations naturelles du niveau piézométrique ne présentent pas de brusques variations au cours du temps (variation de charge journalière inférieure à quelques dizaines de cm et variation saisonnière de l'ordre de 1 à 10 mètres), le milieu peut être considéré comme continu. La variabilité des niveaux piézométriques, démontré supra, est un indicateur de l'influence du climat sur la recharge des réservoirs souterrains et, donc sur les stocks d'eau. [23] explique que les niveaux des eaux souterraines fluctuent naturellement en réponse aux événements climatiques et aux contraintes imposées par les caractéristiques hydrogéologiques et topographiques. Ces fluctuations sont induites par l'infiltration des eaux pluviales, estimée en terme de recharge des aquifères.

1) Recharge de la nappe entre 2009 et 2013 au niveau de la station de Athiémé:

Les fluctuations de la recharge dans la commune de Athiémé montrent que la saison des pluies (Avril à septembre Juillet) est la principale période de renouvellement de la nappe. Les recharges mensuelles sont consignées dans la figure 9.

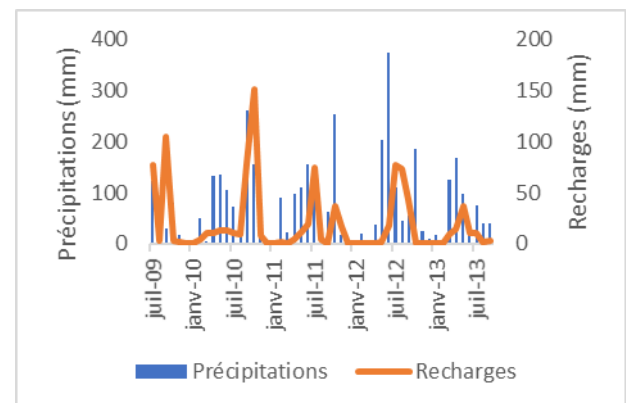


Figure 9: Recharge mensuelle de la nappe à Athiémé

L'analyse de la figure 9 montre que la fluctuation de la nappe varie en fonction des saisons. Au cours de la petite saison sèche la recharge la plus élevée s'observe dans le mois de Octobre avec une valeur de recharge équivalent à 151,6 mm correspondant à une précipitation de 154 mm. De même pendant la grande saison pluvieuse pour un maximum pluviométrie observé en juin, on a un pic de la recharge observé dans le mois d'Aout. Par contre pendant la saison sèche, la nappe se décharge pour une valeur de recharge parfois nulle. La recharge s'effectue pendant la saison des pluies et continue quelque mois après du fait du temps de transit de l'eau dans la zone non saturée (effet piston).

- Bilan annuelle des taux de recharge

A l'échelle annuelle, il y a une bonne corrélation entre la recharge et les précipitations (figure 10)

Tableau II : Bilan des recharges annuelles (2009-2013)

Date	Précipitations Annuelle (mm)	Recharges annuelle (mm)
2009	298,6	189,24375
2010	1063,9	311,48125
2011	978	172,628125
2012	1083	216,375
2013	608,8	85,5

Source : Travaux de terrain, Juillet 2019

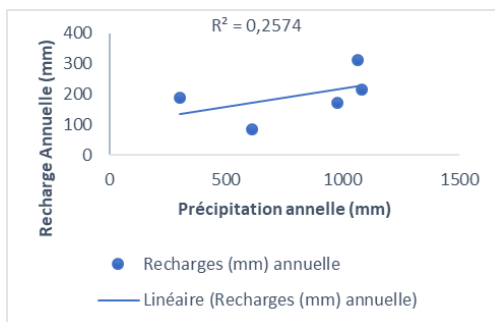


Figure 10: Corrélation entre recharge et pluviométrie annuelles à Athiémé

Les valeurs de recharge varient de 85,5 mm (2013) à 311,48 mm (2010). Le bilan des taux de recharges annuelles est consigné dans le tableau 2.

2) Recharge de la nappe entre 2009 et 2013 au niveau de la station de Bopa:

La figure 11 montre la fluctuation de la recharge pendant la période 2009-2013 établie à partir du modèle WTF. La recharge se produit principalement pendant la saison des pluies. Pour une valeur de précipitation égale à 155 mm on observe une réponse de la nappe égale à 33 mm de recharge. Cependant, pendant la saison sèche, le modèle restitue des valeurs de recharge en l'absence de précipitations.

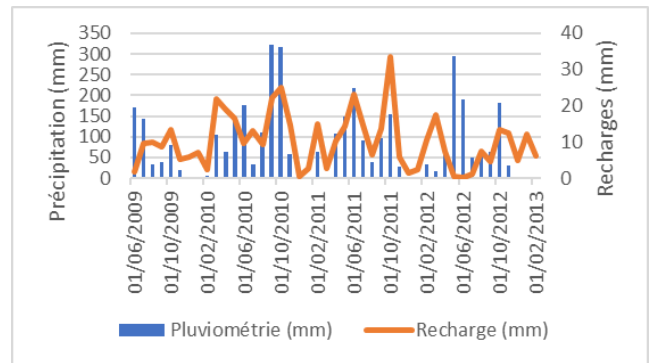


Figure 11: Recharge mensuelle de la nappe à Bopa

La recharge se produit principalement pendant la saison des pluies. Pour une valeur de précipitation égale à 155 mm on observe une réponse de la nappe égale à 33mm de recharge. Cependant, pendant la saison sèche, le modèle restitue des valeurs de recharge en l'absence de précipitations.

- Bilan annuelle des taux de recharge à Bopa

A l'échelle annuelle, il y a une bonne corrélation entre la recharge et les précipitations (figure 12).

Tableau III : Bilan des recharges annuelles (2009-2013)

Date	Recharges (mm)	Précipitations (mm)
2009	54,6375	483,4
2010	161,56875	1323,9
2011	143,18423	945,5
2012	82,0017045	991,8
2013	18	0

Source : Travaux de terrain, Juillet 2019

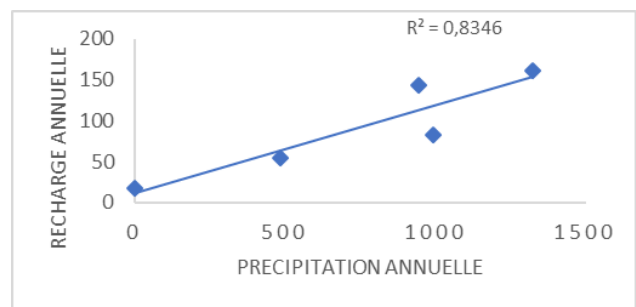


Figure 12 : Corrélation entre recharge et pluviométrie annuelles

Les valeurs de recharge varient de 18 mm (2013) à 161,56 mm (2010). Le bilan des taux de recharges annuelles est consigné dans le tableau 3.

3) Recharge de la nappe entre 2011 et 2016 au niveau de la station de Dogbo:

Les fluctuations de la recharge au niveau du piézomètre de Dogbo montrent que le renouvellement de la nappe s'opère principalement pendant la saison des pluies (figure 13)

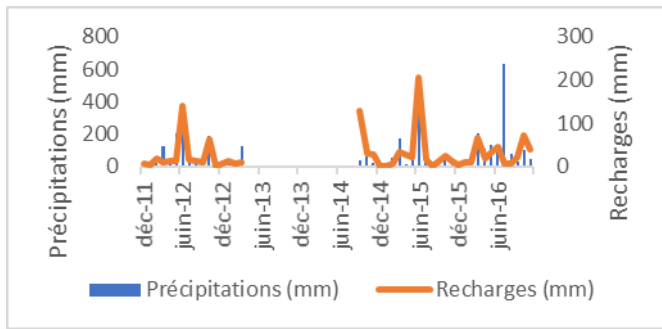


Figure 13 : Recharge mensuelle de la nappe à Dogbo

Cependant, au niveau de ce Piézomètre, des hausses de niveaux (dissimulée par la récession) peuvent être notées en saison sèche. la recharge s'effectue pendant la saison des pluies et continue quelque mois après du fait du temps de transit de l'eau

- Bilan annuelle des taux de recharge

A l'échelle annuelle, il y a une bonne corrélation entre la recharge et les précipitations (figure 14).

Tableau IV : Bilan des recharges annuelles (2011-2016)

Date	Recharges (mm)	Précipitations (mm)
2011	6,29464286	0
2012	297	1196,5
2013	29,2173913	892,6
2014	186,25	1104,3
2015	359,25	974,1
2016	325,75	1425,7

Source : Travaux de terrain, Juillet 2019

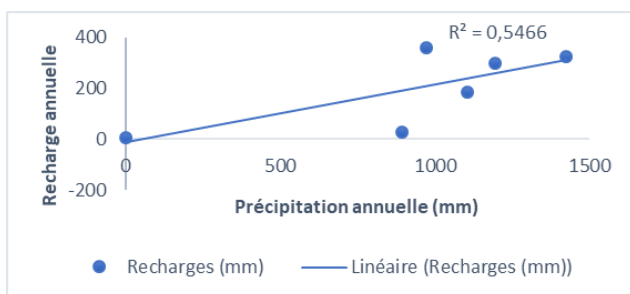


Figure 14 : Corrélation entre recharge et pluviométrie annuelles

Les valeurs de recharge varient de 6,29 mm (2011) à 359,25 mm (2015). Cependant pour une valeur de 0mm de précipitation en Décembre 2011 on observe une réaction positive de la nappe égale à 6,29mm. Ceci montre que dans cette zone la recharge n'est pas la possibilité d'observé une recharge. Cette hausse du niveau de la nappe pourrait être liée au retour des eaux issues des activités humaines (eaux usées domestiques, fuites des conduits d'approvisionnement en eaux potable, suintement des fosses septiques...)

4) Recharge de la nappe en 2011-2013 à Lokossa:

Les fluctuations de la recharge au niveau du Piézomètre de Fongba montrent que la nappe s'est principalement alimentée pendant la saison des pluies, allant de Juillet à Octobre. (figure 15). On observe des hausses de niveaux (dissimulée par la récession) peuvent être notées en saison sèche.

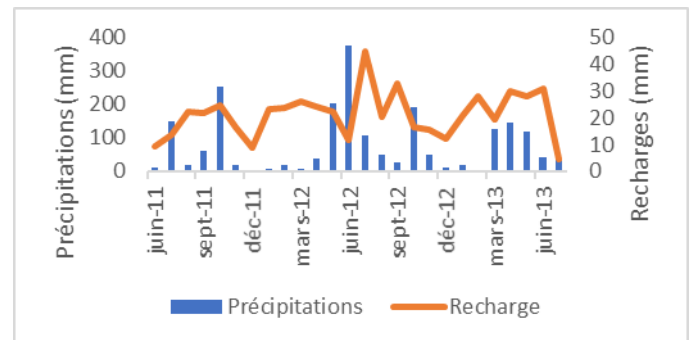


Figure 15: Recharge mensuelle de la nappe à Lokossa

- Bilan annuelle des taux de recharge

Les taux de recharge de la nappe en 2011-2013 varient entre 116,74 mm (2011) à 274,20 mm pour un cumul de 1083 mm au niveau du Piézomètre de Lokossa. tableau V.

Tableau V : Bilan des recharges annuelles (2011-2013) à Lokossa

Date	Précipitations (mm)	Recharges (mm)
2011	509,1	116,74375
2012	1083	274,203125
2013	487,6	162,025

Source : Travaux de terrain, Juillet 2019

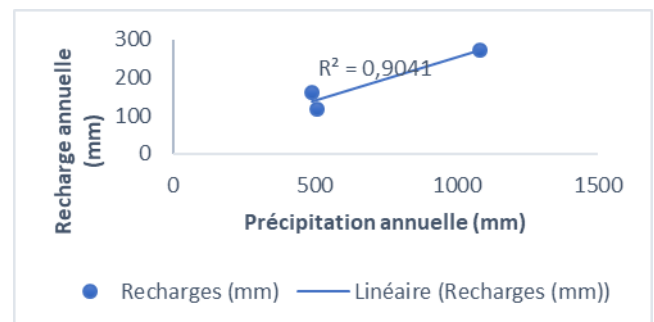


Figure 16 : Corrélation entre recharge et pluviométrie annuelles à Lokossa

A l'échelle annuelle, il y a une bonne corrélation entre les précipitations et la recharge (figure 16). L'estimation de la recharge par la méthode de fluctuation piézométrique ne s'applique qu'aux données d'enregistrement des piézomètres de Badazoui, de Gativé, de Athiéme et de Lokossa qui montrent des variations saisonnières principalement induites par la recharge. L'une des difficultés de cette méthode réside sur la détermination d'une valeur représentative de Sy. A cet effet, les valeurs de la S y, correspondant à la porosité efficace [4] suivants les

caractéristiques de faciès sablo argileux est évalué à 0,15. Au total, seules les chroniques piézométriques présentant des variations nettes ont été retenues par le calcul. Les figures 9,11, 13 et 15 présentent respectivement la variabilité mensuelle des pluies en fonction de la recharge sur les stations piézométriques de Badazoui, de Dogbo, de Athiémé et de Lokossa. Les fluctuations de la recharge montrent que la saison des pluies (de juillet à Octobre) est la principale période de renouvellement de la nappe au niveau des quatre piézomètres. Pour les calculs des recharges, nous avons utilisé les données disponibles sur les quatre station piézométriques. La valeur de la recharge trouvée pour chaque station est proportionnel à la pluviométrie mensuelle enregistré et témoigne de l'influence de la variation des hauteurs pluviométriques sur la recharge du secteur d'étude. La valeur de recharge la plus importante à Athiémé et à Bopa est observée au mois d'Octobre alors que le mois de Septembre constitue le mois le plus pluvieux (322.2 mm) pour Bopa et (260.2 mm). Cette situation suggère qu'au-delà d'une certaine quantité de pluie, la saturation de la nappe est atteinte pendant la petite saison pluvieuse. Cela confirme leur faible sensibilité à la dynamique climatique et l'influence des facteurs lithostratigraphiques, de la profondeur de la zone saturée, etc [17]. De même au cour de la grande saison pluvieuse on observe pendant le mois de Juillet une recharge importante à Dogbo et à Lokossa alors que le mois de Juin constitue le mois le plus pluvieux (375.2 mm) pour Lokossa et (372.4 mm) pour Dogbo. C'est ainsi qu'en saison sèche (Décembre à Mars), néanmoins une pluviométrie inférieure à 100 mm, on observe une baisse de la recharge au niveau des piézomètres des quatre communes. La corrélation établie entre l'infiltration annuelle et les pluies annuelle calculées pour toute la zone à partir des résultats obtenus avec la méthode au niveau de chaque région montre que la recharge observé par endroit n'est pas seulement tributaire de la quantité de pluies, mais que la recharge peut aussi être lié à d'autres facteur climatique comme anthropique. Les aquifères sont alimentés (recharge verticale) par la pluie à différents seuils pluviométriques. Dans notre zone d'étude, l'infiltration a lieu durant 4 mois de l'année, de Juillet à Octobre. Pendant la saison sèche, la nappe se décharge par une forte évapotranspiration qui s'ajoute au taux de drainage net (écoulement vers l'océan ou vers les zones humides). Cependant, la recharge s'effectue pendant la saison des pluies et continue quelque mois après du fait du temps de transit de l'eau dans la zone non saturée. Mais, la recharge des aquifères est plus fonction des effets combinés du climat, des paramètres hydrogéologiques, de l'humidité des sols, de la topographie, des états de surface et des extractions d'eau qu'à leur simple influence.

**B. Méthode de Bilan hydrique**

Cette méthode permet de calculer la valeur de la recharge à l'échelle d'une parcelle ou d'un bassin versant. Le bilan hydrique est basé sur le principe selon lequel la pluie tombée sur le bassin se répartit entre l'évapotranspiration réelle, le ruissèlement, la variation de stock et l'infiltration. Cette évaluation n'est pas aisée du fait delà difficulté à estimer l'ETP qui influence très fortement l'infiltration et qui peut

être grande dans ce contexte. Par conséquent, elle est souvent estimée à partir de l'ETP de Pernman-Monteith. La recharge a été calculé sur la base du bilan hydrique au niveau de quatre (4) stations (Athiémé, Bopa, Dogbo et Lokossa) (Figure 17, 18, 19 et 20) qui présentent des données représentatives de 1970 à 2017. Le ruissèlement est estimé à 0,20 et la réserve facilement utilisable (RFU) à 100mm [17] du fait des faciès qui tapissent la zone d'étude.

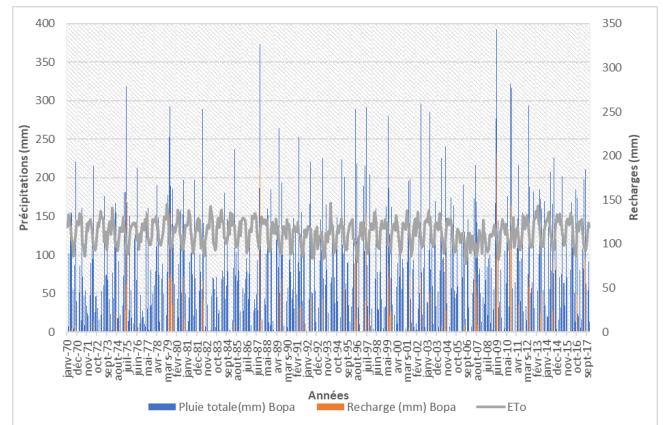


Figure 17 : Estimation de la recharge dans la station Bopa

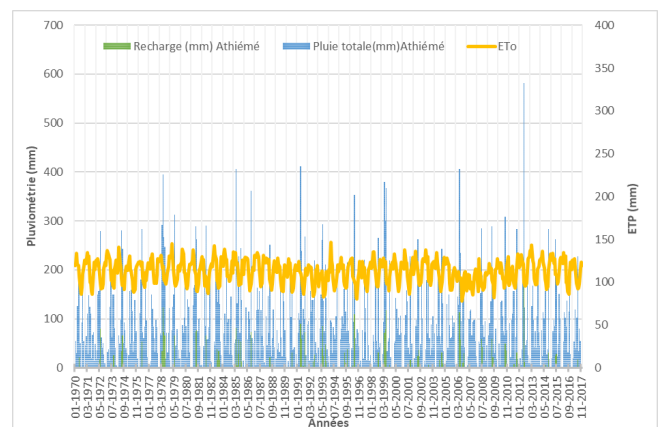


Figure 18: Estimation de la recharge dans la station Athiémé

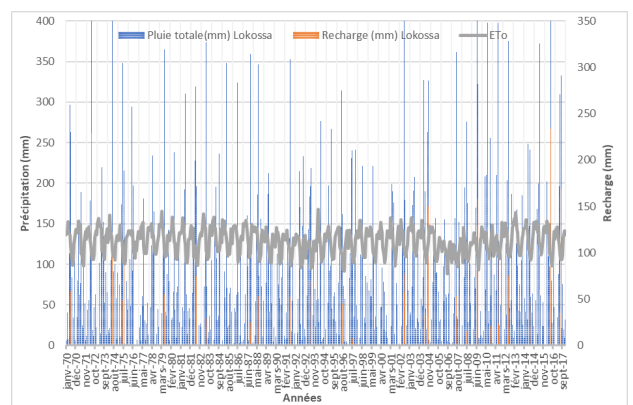


Figure 19 : Estimation de la recharge dans la station Lokossa

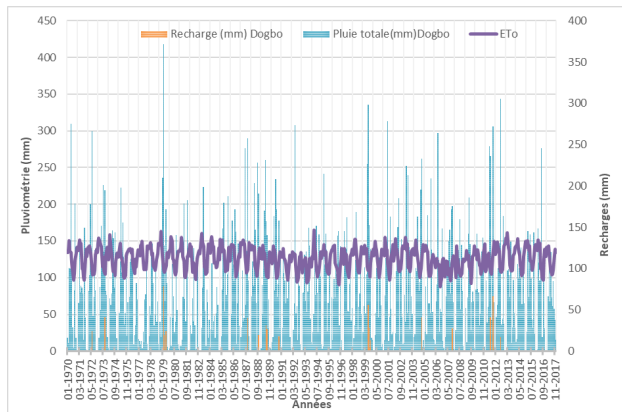


Figure 20 : Estimation de la recharge dans la station Dogbo

Les valeurs calculées de recharge sont significatives à la station de Bopa et de Lokossa. Au niveau de la station de Bopa on observe plusieurs valeur de recharge : en Juin 1975 on obtient pour valeur 172,6mm ; en Spetembre 1987 on obtient 213,1mm comme recharge ; en Juin 1997 on a 153mm comme recharge ; en Juin 2009 on a pour valeur de recharge 231,8mm ; en Septembre 2010, la recharge est de 129,8mm ; en Juillet 2017 on obtient également une recharge égale à 94,7mm. Aussi au niveau de la station de Lokossa on a successivement : en Juin 1972 on observe une recharge d'une valeur de 262,3mm ; en juin 1974 on a une recharge de 129,3mm ; en Octobre 2004 on a une recharge de 171,8mm ; Juin 2009 on a une recharge d'une valeur de 148mm ; en Juin 2010 on a une recharge de 140 mm ; Juillet 2016 on a une recharge de 266mm et en Juillet 2017 on obtient une recharge d'une valeur de 192mm. Par contre aucune recharge significative n'est obtenu sur la station de Dogbo et de d'Athiémé. On obtient quelques valeur minimal à Dogbo et des valeur presque nulle à Athiémé. Cette méthode montre une recharge de la nappe qui varie en fonction des années et des zones d'étude. L'analyse des moyennes mensuelles des précipitations, de l'ETP, et de la recharge calculées sur l'ensemble de la zone pour la période 1970 – 2017 (figure 17, 18, 19 et 20) permet de dégager une esquisse conceptuelle de la recharge dans le système aquifère du paléocène supérieure. La recharge calculée avec un stock moyen (pondéré) de 150 mm pour toute la zone des quatre stations évoluent en « dents de scies » et sont très variables suivant les stations (0 à 10 mm/mois) pour les stations de Athiémé et de Dogbo et (50 à 250mm) pour les stations de Bopa et de Lokossa. En effet selon la méthode de bilan de masse la recharge dépend de l'intensité et de la durée des averses enregistrées dans la région, cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'elle est tributaire également des précipitations précédentes. En effet, dans notre zone d'étude, l'infiltration a lieu durant 4 mois de l'année, de Juillet à Octobre. De Novembre à Mai, les précipitations sont nulles donc inférieures à l'ETP. L'ETR est ainsi alimentée par le « stock en eau » qui décroît jusqu'à s'annuler au mois de Mars. Dès le début des premières pluies en Juin - Juillet, l'excès des précipitations non repris par l'ETR contribue à reconstituer en premier le « stock en

eau » du sol qui augmente mais n'atteint pas sa valeur maximale. Une fois la capacité maximale du stock atteinte l'eau commence à s'infiltrer vers la nappe. Elle baisse progressivement au fur et à mesure que les précipitations diminuent. Au mois d'Octobre (vers la fin de la saison des pluies) les précipitations sont inférieures à l'ETP et ne servent qu'à l'ETR qui reprend également une partie du « stock » qui baisse. L'infiltration diminue également pour être nulle à partir du mois de Novembre. La nappe se recharge pendant la saison des pluies qui dure environ 3 mois et se décharge par évapotranspiration pendant le reste de l'année. Au vu de ces résultats, l'estimation de la recharge reste difficile à appréhender avec précision. En effet, les paramètres utilisés pour son estimation sont souvent mal connus et les différents processus qui se déroulent lors du transit de l'eau dans la zone non saturée vers la nappe sont complexes Malgré ces limites, l'ETP estimée avec la méthode de Penman peut constituer une valeur guide, pour le calage des autres méthodes car étant probablement plus proche de la réalité [8]. Ces valeurs de recharge bien que présentant des incertitudes pourront toutefois servir comme données d'entrée du modèle. Ces valeurs doivent être spatialisées au niveau des mailles.

#### IV. CONCLUSION

Les épisodes climatiques déterminent la variation quantitative des eaux souterraines dans le bassin d Mono-Couffo. La présente étude s'est attelée à évaluer la recharge dans la zone d'affleurement du Paléocène supérieure situé dans le bassin du Mono-Couffo. De nombreuses méthodes, basées sur une grande variété de mesures indirectes, niveaux d'eau dans les puits, débits de rivières, traceurs géochimiques et les mesures de températures, existent pour estimer la recharge. Les taux de recharge peuvent varier dans le temps et l'espace sur plusieurs ordres de grandeur selon le climat, la géologie, l'hydrologie, la topographie, la couverture végétale et un ensemble de facteurs anthropiques [4,11,15,16, 17]. Or, chaque méthode permet d'estimer la recharge à l'intérieur d'une plage de valeurs limitée, avec des échelles d'applications spatiales et temporelles qui varient énormément d'une méthode à l'autre. Dans notre zone d'étude, l'infiltration a lieu durant 4 mois de l'année, de Juillet à Octobre. Pendant la saison sèche, la nappe se décharge par une forte évapotranspiration qui s'ajoute au taux de drainage net (écoulement vers l'océan ou vers les zones humides). L'analyse comparée des régimes de pluies et de niveaux du toit des nappes montre, pour un régime pluviométrique moyen bimodal, un régime piézométrique unimodal. Le maximum piézométrique, mettant en évidence le temps de réponse des nappes souterraines est observé en Juillet. La recharge s'effectue pendant la saison des pluies et continue quelque mois après du fait du temps de transit de l'eau dans la zone non saturée. Par contre les résultats obtenus par la méthode de bilan hydrique nous montrent que sur les quatre stations, seulement deux stations ont pu obtenir une recharge significative. La recharge des aquifères est plus fonction des effets combinés du climat, des paramètres hydrogéologiques, de l'humidité des sols, de la topographie, des états de surface et des extractions d'eau

qu'à leur simple influence. Ce qui confirme les résultat de [17] qui explique que la disponibilité de l'eau pluviale pour la recharge des aquifères dépend non seulement de la pluie et de la demande évaporatoire mais aussi de la variation de l'humidité des sols et du type de sol. Cela confirme leur faible sensibilité à la dynamique climatique et l'influence des facteurs lithostratigraphiques, de la profondeur de la zone saturée.

#### REFERENCES

- [1] Vissin E.W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.
- [2] Afouda F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat, Institut de Géographie, Université Paris IV (Sorbonne), France, 428 p.
- [3] Taylor, C.B., Wilson, D.D., Brown, L.J., Stewart, M.K., Burden, R.J., Brailsford, G.W. (1989) Sources and flow of North Canterbury plains groundwater, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 106:311-340
- [4] Boukari M., 1998. Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse Doctorat ès-Science. Université Cheick Anta Diop de Dakar, Sénégal, 278 p. + annexes.
- [5] Rutulis M., 1989. Groundwater drought sensitivity of southern Manitoba. *Canadian Water Resources Journal*, 14, 18-33.
- [6] Hafmann N., Mortsch L., Donner S., Dunacan K., Kreuzwiser R., Kulshreshtha S., Piggott A., Shellenberg S., Schertzer B., Slivizky M., 2000. Climate change and variability: impacts on Caanadian water. Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada, University of Waterloo, 120 p.
- [7] Lihoussou, 2001. Atlas monographique des communes du Bénin ; Cotonou, Bénin ; MISD, CIDL, DED ; ++p.
- [8] Boukari M., 2002. Réactualisation des connaissances hydrogéologiques relatives au bassin sédimentaire côtier du Bénin. Direction de l'Hydraulique, Cotonou, 134 p. + annexes.
- [9] Burgeap-BRGM, 1994. Projet d'alimentation en eau potable des zones lacustres des Départements de l'Atlantique et de l'Ouémé. Rapport final, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin, 64 p. Calder I.R., 1993. Hydrologic effects of land-use change, in: *Handbook of hydrology*, edited by: Maidment D.R., McGraw-Hill, New York, USA, 13.1-13.50.
- [10] Dray M., Giachello L., Lazzarotto V., Mancini M., Roman E., Zuppi G.M., 1989. Etude isotopique de l'aquifère crétacé du bassin côtier béninois. *Hydrogéologie* 3, 167-177.
- [11] Alassane A., 2004. Etude hydrogéologique du Continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : Identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat du 3ème cycle. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 145 p. + annexes.
- [12] Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
- [13] Delin G.N., Falteisek J.D., 2007, Ground-Water Recharge in Minnesota: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3002, 6 p.
- [14] Hall D., Risser D., 1993. Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster County, Pennsylvania. *Water Resources Bulletin*, 29, 55-76.
- [15] Healy W.R., Cook G.P., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
- [16] Faye S., Diaw M., Ndoye S., Malou R., Faye A., 2008. Groundwater recharge and salinization in Senegal coastal semiarid regions: Implication of climate change. *Groundwater and Climate in Africa (Proceedings of the Kampala Conference, June 2008)* IAHS Publication. 334-21, 163-173.
- [17] Totin V.S.H., 2010. Assessment of Global Change Impacts on Groundwater in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). Report for Africa Global Environmental Change Research Grant. *Global Change SysTem for Analysis, Research and Training (START)* 61 p.
- [18] Totin V.S.H., Boukari M., Boko M., 2009. Groundwater Recharge Mechanisms and Water Management in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). *Groundwater and Climate in Africa. Proceedings of the Kampala Conference, June 2008* IAHS Publ. 334-21, 127-134.
- [19] OMM, 2006. Hydrologie. Vol. III, Document de base N° 2, Genève Suisse, 104 p.
- [20] GIGG, 1987. Ville de Cotonou - Plan directeur : Alimentation en eau potable. Tome I. Les ressources en eau. Rapport d'étude. Cotonou, Bénin, 90 p. + Annexes.
- [21] BRGM. (2015). Manuel Utilisateur ESPERE. Version 1.5.
- [22] Allen G.R., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56, FAO, - 372 p.
- [23] Korkmaz N., 1988. The estimation of groundwater recharge from water level and precipitation data. *Journal of Islamic Academy of Sciences* 1(2), 87-93.