



**EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA  
COMMUNE DE ZOGBODOMEY.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
**MASTER**

*SPECIALITE : GENIE-CIVIL ET HYDRAULIQUE (GCH)*

*OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques (IRH)*

.....

Présenté et soutenu publiquement le 24 janvier 2020 par

**Carole Claudia Houéfa ASSOGBA (2013 0997)**

**Directeur de mémoire : Mahamadou KOITA, Docteur en Hydrogéologie, Enseignant-chercheur (DEAA, LEHSA -2iE)**

**Encadrant 2iE : Angelbert Chabi BIAOU, Docteur en Hydrologie/Hydrogéologie, Enseignant-chercheur (LEHSA -2iE)**

**Maître de stage : Sylvie DEKA, Ingénieur Génie civil (IGIP AFRIQUE Sarl Bénin)**

**Structure d'accueil du stage : IGIP AFRIQUE Sarl Bénin**

**Membres du jury :**

**Président : Dr. Igor OUEDRAOGO**

**Examineurs : Dr. Elie SAURET**

**Dr. Hamma Fabien YONLI**

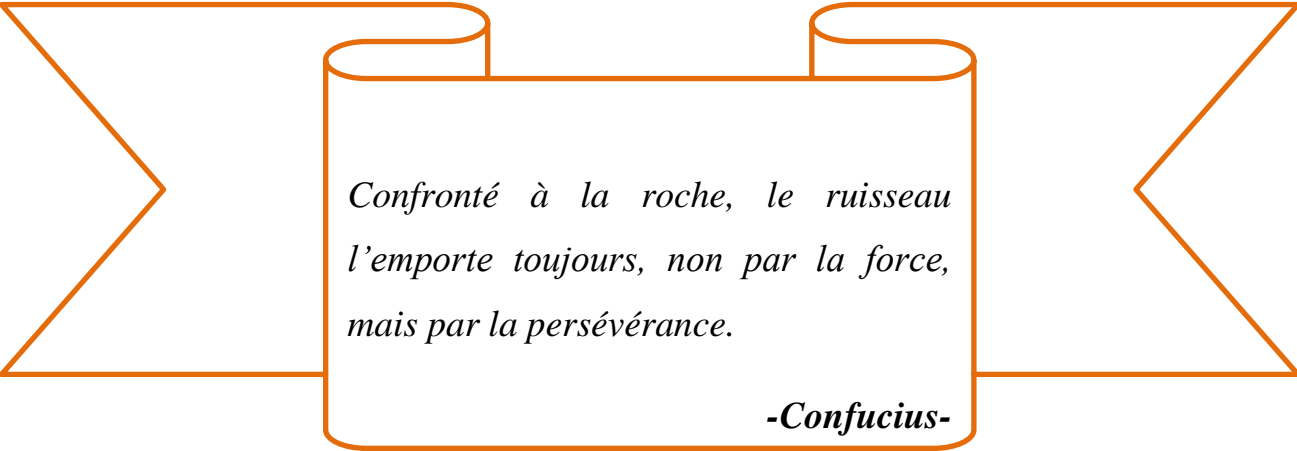
**Promotion [2019/2020]**

## DEDICACES

### A ma famille

A mon père Arthur ASSOGBA et à ma mère Colette ASSOGBA/BODJRENOU, qui peuvent trouver ici le fruit de leurs longues années de sacrifices, de prières et de privations pour m'offrir un avenir meilleur. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation, l'amour et le soutien venus de vous ; A mon frère et mes sœurs, pour votre amour à mon égard et votre soutien sans faille.

## CITATION



*Confronté à la roche, le ruisseau  
l'emporte toujours, non par la force,  
mais par la persévérance.*

*-Confucius-*

## AVANT-PROPOS

Bureau d'études béninois spécialisé dans le domaine de l'eau, de l'environnement, du BTP et de l'assainissement depuis près de 18 ans, IGIP AFRIQUE Sarl Bénin dispose de toutes les compétences pour offrir des services complets d'ingénierie et d'appui au développement. Cette structure développe ses activités pour accompagner les donneurs d'ordre publics et privés, depuis les études de définition jusqu'au suivi des travaux, en passant par d'avant-projet détaillé et l'assistance technique. Cette société fait partie du groupe GIHSE (GITEC-IGIP HOLDING SE) ce qui lui permet de renforcer son assise sur le plan technique, stratégique et financière. Ce bureau d'étude intervient dans plusieurs domaines tels que l'alimentation en eau potable en milieu rural et urbain et l'assainissement, le drainage des eaux pluviales et eaux usées, hydrologie.

Le stage effectué au sein de IGIP AFRIQUE Sarl Bénin, sanctionné par ce présent mémoire rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme d'ingénieur 2iE avec grade de Master, spécialité Génie Civil et Hydraulique (GCH), option Infrastructures et Réseaux Hydrauliques (IRH). Il consista à évaluer la recharge naturelle d'un aquifère de Crétacé dans la commune de ZOGBODOMEY et sa vulnérabilité à la pollution. L'idée de ce mémoire de recherche est venue du constat que la gestion quantitative et qualitative des aquifères est très peu suivie au Bénin.

En effet, la recharge d'un aquifère est très importante surtout quand ce dernier est utilisé pour l'alimentation en eau potable des populations. La recharge permet d'assurer une longue pérennité dans le temps de la ressource souterraine exploitée. De même, il faut tenir compte de la qualité de l'eau mise à la disposition des populations. Cette étude se veut être une contribution devant permettre de faire un suivi pointu de l'aquifère de crétacé présent dans la commune de ZOGBODOMEY mais aussi d'attirer l'attention sur la gestion des ressources en eau douce qui se font de plus en plus rares.

Des difficultés n'ont pas manqué, elles ont concerné particulièrement la disponibilité de données fiables et récentes. Cette situation nous a obligé à nous contenter des informations et données que nous avons collectées auprès des organismes habilités à en fournir et de nos recherches documentaires.

## REMERCIEMENTS

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

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

- Tout d'abord, mes remerciements vont au Docteur Mahamadou KOITA pour avoir accepté de diriger ce mémoire. Qu'il trouve ici toute ma reconnaissance ;
- Docteur Angelbert Chabi BIAOU, mon encadreur interne qui n'a ménagé aucun effort pour nous accompagner ;
- Monsieur Edmond NASSALA, Directeur Général du bureau d'étude IGIP AFRIQUE Sarl Bénin, qui a bien voulu m'accepter, en qualité de stagiaire au sein de sa structure ;
- Madame Sylvie DEKA, Monsieur Boniface GNONLONFOU et Monsieur LAWSON Ingénieurs Génie-Civil à IGIP AFRIQUE Sarl Bénin, pour l'assistance et les conseils durant tout le stage ;
- Monsieur Narcisse AGBATCHI, Ingénieur, Chef-projet du Département Eau et Assainissement à IGIP AFRIQUE Sarl Bénin pour son accompagnement ;
- Monsieur Jean-Claude GBODOGBE, Docteur en Géophysique, Secrétaire Général du Ministère de l'Energie et des Mines du Bénin pour m'avoir donné de son temps et m'avoir permis de beaucoup apprendre ;
- Madame Bénédicte HOUNGBEDJI, Chargée des Programmes et Projets Eau, Directrice Départementale de L'Eau et des Mines Ouémé/Plateau pour son soutien, ses conseils, sa patience et son aide précieuse pour l'obtention de ce stage.
- Mon frère et mes sœurs pour leurs affections. J'espère être une fierté et un modèle pour vous ; je voudrais que ce travail inspire chacun de nous à œuvrer davantage.
- Toute la grande famille ASSOGBA et BODJRENOU pour leurs soutiens et leurs encouragements. Puissiez-vous recevoir à travers ce modeste travail une part de la satisfaction de vos efforts dévoués.
- Enfin mes remerciements se tournent vers ADEOTAN Younaïse, HOUNKPATIN Elvire, AKAKPO Arlette, TIONO Boureïma, ainsi que mes autres frères et sœurs de 2iE pour la compagnie, les critiques et les observations.

*Que ce rapport soit pour vous le fruit de vos efforts !*

## **RESUME**

Cette étude vise à améliorer les connaissances en hydraulique souterraine sur la quantification de la recharge naturelle de l'aquifère continu de créacé de la commune de ZOGBODOMEY ainsi qu'une évaluation de sa vulnérabilité à la pollution.

Un bilan hydrique du milieu nous a permis de faire ressortir les valeurs des différents paramètres (recharge, ETR, vitesse d'infiltration), que nous avons utilisé pour faire l'analyse de sensibilité des autres paramètres sur la recharge et l'analyse prévisionnelle. La quantification de la recharge s'est faite par la méthode du bilan hydrique en suivant l'algorithme de Thornthwaite. Les variables considérées pour l'analyse de sensibilité sont la pluviométrie, la température, l'ETR, la recharge (infiltration) et la vitesse d'infiltration. Les individus sont les mois de l'année sur une période de six (06) ans (2011-2016) et à l'horizon du projet (2030), la recharge est estimée à 296,27 mm.

Par ailleurs, l'étude de la qualité de l'eau de la nappe de l'aquifère de ZOGBODOMEY nous a permis de conclure que cette eau est de qualité acceptable même s'il reste nécessaire d'y apporter quelques traitements pour la rendre potable.

### **Mots clés :**

---

- 1. Aquifère**
- 2. Bilan hydrique**
- 3. Qualité de l'eau**
- 4. Recharge naturelle**

### **ABSTRACT**

This study aims to improve underground hydraulic knowledge on the quantification of the natural recharge of the continuous cretaceous aquifer of the municipality of ZOGBODOMEY as well as an assessment of its vulnerability to pollution.

A water balance of the environment allowed us to highlight the values of the various parameters (recharge, ETR, infiltration rate), which we used to make the sensitivity analysis, and the forecast analysis. Quantification of the recharge was done by the Water table budget method following the Thornthwaite algorithm. The variables considered for the sensitivity analysis are rainfall, temperature, ETR, recharge (infiltration) and infiltration rate. Individuals are the months of the year over a period of six (06) years (2011-2016) and on the project horizon, recharge is estimated at 296,27 mm.

Moreover, the study of the water quality of ZOGBODOMEY aquifer allowed us to conclude that this water is of acceptable quality, even if it remains necessary to provide some treatment to make it potable.

#### **Keywords :**

---

- 1. Aquifer**
- 2. Water budget**
- 3. Water quality**
- 4. Natural recharge**

## LISTE DES ABREVIATIONS

- AEP** : Adduction d'Eau Potable
- BSC** : Bassin Sédimentaire Côtier
- DG-Eau** : Direction Générale-Eau
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle
- ETR** : Evapotranspiration Réelle
- IGN Bénin** : Institut Géographique National Bénin
- INSAE** : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
- ODD** : Objectifs de Développement Durable
- OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- ONU** : Organisation des Nations Unies
- pH** : Potentiel Hydrogène
- PND** : Plan National de Développement
- RFU** : Réserve en eau Facilement Utilisable
- RU** : Réserve Utile
- RGPH-4** : Recensement Général de la Population et de l'Habitat n°4
- SONEB** : Société Nationale des Eaux du Bénin
- T.A.C** : Titre Alcalimétrique Complet
- 2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Valeur de la RU en fonction du type de sol (A. Keïta, 2009).....	15
<b>Tableau 2:</b> Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. ....	19
<b>Tableau 3:</b> Evaluation de l'ETP.....	24
<b>Tableau 4:</b> Evaluation de la pluie efficace. ....	25
<b>Tableau 5:</b> Evaluation de la lame d'eau infiltrée par la méthode du bilan hydrique. ....	26
<b>Tableau 6:</b> Quantification du volume d'eau stocké par année.....	27
<b>Tableau 7:</b> Calcul des vitesses d'infiltration.....	27
<b>Tableau 8:</b> Indices de sensibilité. ....	30
<b>Tableau 9:</b> Estimation de la population à l'horizon 2030.....	33
<b>Tableau 10:</b> Estimation des besoins en eau de la population à l'horizon 2030. ....	33

## LISTE DES FIGURES ET GRAPHES

<b>Figure 1:</b> Localisation de la commune de ZOGBODOMEY.....	4
<b>Figure 2:</b> Illustration de l'aquifère de Crétacé dans la commune de ZOGBODOMEY. (ACHIDI et al, 2010) .....	6
<b>Figure 3:</b> Subdivision de la période Crétacé selon l'UISG.....	7
<b>Figure 4:</b> Pluviométries mensuelles de 2011 à 2016 (Climatologie_Statistiques sur la climatologie - Benin Data Portal , 2017).....	13
<b>Figure 5:</b> Températures mensuelles de 2011 à 2016 (www.infoclimat.fr).....	13
<b>Figure 6:</b> Les principes de recharge directe et indirecte. ....	20
<b>Figure 7:</b> Mécanisme de la recharge directe.....	20
<b>Figure 8:</b> Localisation des huit nouveaux forages.....	28
<b>Figure 9:</b> Coupe géologique de la zone d'étude. ....	29
<b>Figure 10:</b> Moyenne mobile .....	31
<b>Figure 11:</b> Droite de régression linéaire.....	31
<b>Figure 12:</b> Régression polynomiale. ....	32
<b>Figure 13:</b> Illustration des modes de pollution (SIGES, 2019).....	34

## SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	3
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....	4
I-1. Situation géographique .....	4
I-2. Relief.....	5
I-3. Climat et pluviométrie .....	5
I-4. Hydrographie et végétation.....	5
I-5. Géologie.....	5
I-6. Contexte hydrogéologique .....	7
I-7. Caractéristiques démographiques et activités économiques .....	7
CHAPITRE II : MATERIELS, DONNEES ET METHODES.....	9
II. MATERIELS ET METHODES.....	10
II-1. Matériels .....	10
II-2. Méthodologie de travail.....	10
II-2-1. Phase de recherche documentaire et de collecte des données .....	10
II-2-2. Phase du traitement des données .....	10
II-2-2-1. Présentation des différentes méthodes d'estimation de la recharge des eaux souterraines et choix des méthodes appropriées.....	10
1) Méthode de la fluctuation de la nappe phréatique (Water table fluctuation) .....	11
2) Méthode du bilan hydrique (Water budget method) .....	11
3) Loi de Darcy.....	11
4) Relations empiriques .....	11
5) Modèles numériques d'un aquifère.....	12
II-2-2-2. Données pluviométriques mensuelles et températures mensuelles .....	12
II-2-2-3. Le coefficient de ruissellement .....	14
II-2-2-4. L'évapotranspiration potentielle .....	14
II-2-2-5. L'évapotranspiration réelle (ETR).....	15

II-2-2-6. La pluie efficace.....	16
II-2-2-7. Evaluation de la lame d'eau infiltrée (recharge naturelle directe).....	16
II-2-2-8. Vitesse d'infiltration .....	17
II-3. Hydrogéologie du milieu .....	17
II-3-1. Coupe lithologique du sol .....	17
II-3-2. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère .....	18
II-3-3. Les différents types de recharge.....	19
II-4. Analyse de sensibilité.....	20
II-5. Analyse prévisionnelle .....	21
II-6. Evaluation des besoins en eau à l'horizon du projet (2030) .....	21
II-7. Analyse de la qualité de l'eau .....	22
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	24
III-1. Hydrologie de surface du milieu.....	24
III-1-1. L'évapotranspiration potentielle .....	24
III-1-2. La pluie efficace.....	25
III-1-3. Evaluation de la lame d'eau infiltrée (recharge naturelle directe).....	25
III-1-4. Vitesse d'infiltration .....	27
III-2. Hydrogéologie du milieu .....	28
III-2-1. Coupe lithologique du sol .....	28
III-3. Analyse de sensibilité .....	30
III-4. Analyse prévisionnelle.....	31
III-5. Evaluation des besoins en eau à l'horizon du projet (2030) .....	33
III-6. Analyse de la qualité de l'eau .....	33
III-6-1. Analyses physico-chimiques et bactériologiques .....	34
III-6-2. Sources possibles de contamination/pollution .....	35
III-6-3. Approches de solutions .....	36
CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	37

RECOMMANDATIONS .....	38
BIBLIOGRAPHIE .....	39
IV. ANNEXES .....	xiii
Annexe N°1: Données pluviométriques et climatologiques de la station synoptique de Bohicon. .....	xiv
Annexe N°2: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY fournies pour les huit nouveaux forages.....	xv
Annexe N°3 : Les valeurs de la RFU. ....	xv
Annexe N°4: Logs stratigraphiques des nouveaux forages .....	xvi
Annexe N°5: Indices de sensibilité. ....	xxii
Annexe N°6: Evaluation des besoins en eau de la population-cible du projet de renforcement du système d'AEP des villes d'Abomey, Bohicon et environs (pour l'année 2030). ....	xxiii
Annexe N°7: Fiche d'analyses physico-chimiques du laboratoire central d'analyses d'eau.....	xxiv
Annexe N°8: Fiche d'analyses bactériologiques du laboratoire central d'analyses d'eau.....	xxvii

## INTRODUCTION

L'eau est une ressource très importante au cœur du développement durable et est essentielle au développement socio-économique, à la production d'énergie et d'aliments, à la santé des écosystèmes et à la survie de l'humanité. L'eau est également au cœur de l'adaptation aux changements climatiques (ONU 2010). Cet « or bleu » se fait de plus en plus rare. Nombreux sont les pays du monde qui sont confrontés à des problèmes d'approvisionnement en eau potable et le Bénin, pays situé en Afrique de l'Ouest (pays côtier), n'échappe pas à ce phénomène. En effet pendant que le besoin augmente, l'offre quant à elle diminue et est très peu satisfaisante. C'est dans l'optique de pallier ce problème que le Bénin, à travers son nouveau programme intitulé Plan National de Développement (PND) vise l'atteinte des Objectifs de Développement Durable (ODD) qui prévoient l'accès de l'eau à tous en quantité et en qualité à l'horizon 2030. En 2016, il a été évalué dans le cahier des charges du projet de renforcement du système d'adduction d'eau potable des villes d'Abomey, Bohicon et environs (IGIP AFRIQUE), un déficit de 411 m<sup>3</sup>/h d'eau brute pour satisfaire les besoins de la population. Ce projet qui justifie nos présentes études, vise à l'horizon du projet (2030) une amélioration significative de l'alimentation en eau potable des populations des villes d'Abomey, Bohicon et leurs environs. De ce fait, huit nouveaux forages ont été réalisés en 2018 pour compléter d'autres forages existants pour le compte du projet. Face à cette grande sollicitation de l'aquifère disponible, il s'impose alors un véritable devoir de gestion durable et de protection de la ressource en eau souterraine exploitée.

L'élaboration de ce mémoire passe par une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique de la zone, une caractérisation de l'aquifère et l'établissement des liens potentiels entre les différents paramètres et la recharge de l'aquifère. Tout ceci permettrait alors de comprendre le mode de fonctionnement de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY ainsi que sa sensibilité à certains paramètres tels que la pluviométrie et la fluctuation climatique, et à la pollution à travers une étude intitulée : « Evaluation de la recharge naturelle d'un aquifère dans la commune de ZOGBODOMEY et de sa vulnérabilité à la pollution ».

L'objectif global de ce projet est l'amélioration de la qualité et du niveau de vie de nos villes cibles. Mais de façon spécifique, il sera question de :

- Estimer la recharge de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY (2011 à 2016) ;

- Réaliser l'analyse de sensibilité des paramètres et l'analyse prévisionnelle de la recharge à l'horizon du projet ;
- Evaluer la qualité de l'eau de la nappe de l'aquifère.

### *Organisation du document*

Le présent mémoire s'articule autour de trois grandes parties. La première partie traite de la présentation générale de la commune de ZOGBODOMEY. La deuxième partie met l'accent sur la présentation du matériel, des données et des méthodes adoptées pour atteindre chaque objectif spécifique. Enfin, la troisième partie est consacrée à la présentation des principaux résultats, à l'interprétation et à la discussion de ces résultats. Le mémoire s'achève par une conclusion et des recommandations.



**CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

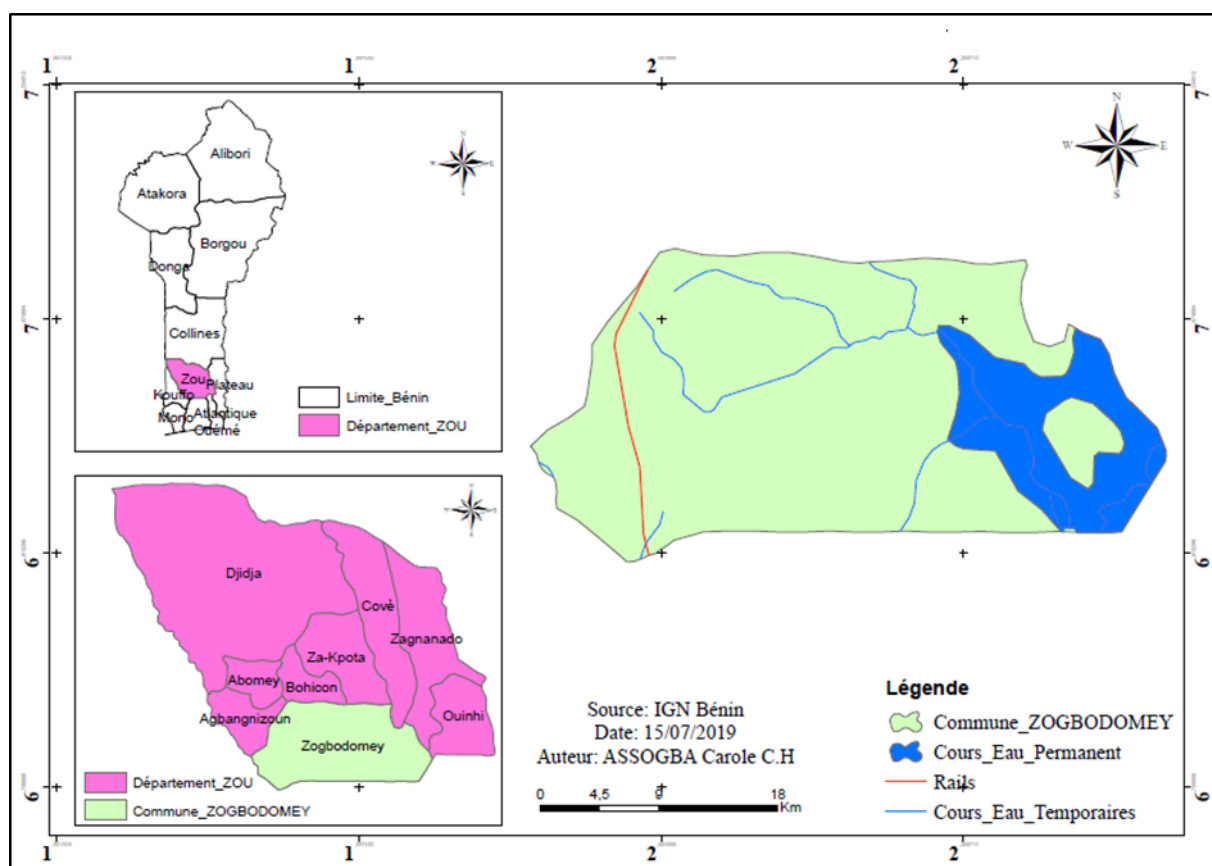


## I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### I-1. Situation géographique

La commune de ZOGBODOMEY est située dans la partie méridionale du plateau d'Abomey à 150 km de Cotonou. Elle est comprise entre 6°56' et 7°08' de latitude Nord, 1°58' et 2°24' de longitude Est et se trouve à l'entrée du département du Zou en allant et couvre une superficie de 825 km<sup>2</sup>. Elle est limitée :

- Au Nord par les communes de Bohicon et de Za-kpota ;
- Au Sud par les départements de l'Atlantique et du Couffo ;
- A l'Est par les communes de Covè, Zagnanado et Ouinhi ;
- A l'Ouest par la commune d'Agbangnizoun.



**Figure 1:** Localisation de la commune de ZOGBODOMEY.

## **I-2. Relief**

Le relief de la commune de ZOGBODOMEY est caractérisé par de vastes vallées des fleuves Zou et Ouémé, des zones de plateau d'altitude faible et une zone de dépression de la LAMA. Ce relief est caractérisé par des plaines et des plateaux engendrant une dénivelée d'environ 270 m entre le point le plus haut situé dans la portion nord de la commune et le point le plus bas dans la pointe Sud. Les pentes y sont généralement de moins de 5% (LALÈYÈ et al, 2014).

## **I-3. Climat et pluviométrie**

Le climat est de type subéquatorial (deux saisons sèches et deux saisons des pluies) et la température moyenne annuelle varie entre 23°C et 33°C. Les vents dominants sont :

- ✓ la mousson d'origine maritime favorisant les pluies ;
- ✓ l'harmattan d'origine continentale, pendant la grande saison sèche.

Les précipitations sont abondantes au cours de l'année et le climat est caractérisé par quatre saisons : deux saisons de pluie (avril à juin et septembre à novembre) et deux saisons sèches (juillet à août et décembre à mars).

## **I-4. Hydrographie et végétation**

Le réseau hydrographique est composé de plusieurs cours d'eau tels que: le fleuve Zou, le fleuve Ouémé, les lacs Hounto, Koto, Samion, Hlan, Da, et Dohou.

La végétation est essentiellement composée de :

- forêt classée située à Massi et Agrimey d'une superficie totale de 6500 ha;
- forêt galerie le long des cours d'eau;
- forêt artificielle plantée de *Tectoma grandis* et de *Gmélina Arborea*;
- forêt marécageuse à Lokoli;
- forêt classée de la LAMA.

## **I-5. Géologie**

Du point de vue géologique, la commune se situe dans sa partie Nord sur du grès de Crétacé (que recouvre plus au nord le continental terminal) et dans sa partie sud dans une dépression sur des sédiments argileux. Le «Continental terminal» est représenté par des formations conglomératiques et argilo-sableuses, effectivement continentales, reposant sur une série continue du crétacé. Dans cette zone on retrouve de la « terre barre » (mélange très homogène de l'argile et du sable). Le bassin sédimentaire côtier, incliné faiblement dans la direction

Sud-Est (S-E) est divisé en deux hauteurs appelées plateaux du nord (ici plateau d'Abomey-Bohicon) et plateaux du sud (ici plateau d'Allada) par une dépression suivant la direction Est-Ouest (E-W) appelée dépression de la LAMA. Le raccordement de la dépression avec le plateau du sud se fait par une pente brutale alors qu'il est progressif avec celui du nord (Houessou Aurélien, Lang Jacques 1978).

On déduit donc par rapport au tableau de la subdivision de la période Crétacé selon l'Union Internationale des Sciences Géologiques (UISG) ci-dessous que la commune de ZOGBODOMEY repose sur l'intégralité de sa surface sur une partie de l'aquifère continu de Crétacé supérieur soit un aquifère de 825 km<sup>2</sup>. Les images ci-dessous illustrent respectivement notre zone dans le bassin sédimentaire côtier (BSC) du Bénin et la subdivision de la période Crétacé (Crétacé, période géologique 2019).



**Figure 2:** Illustration de l'aquifère de Crétacé dans la commune de ZOGBODOMEY. (ACHIDI et al, 2010)

Période	Séries	Étage	Âge (Ma)
Paléogène	Paléocène	Danien	Plus jeune
Crétacé	Supérieur	Maastrichtien	72.1 - 66.0
		Campanien	83.6 - 72.1
		Santonien	86.3 - 83.6
		Coniacien	89.8 - 86.3
		Turonien	93.9 - 89.8
	Inférieur	Cénomaniens	100.5 - 93.9
		Albien	≈113.0 - 93.9
		Aptien	≈125.0 - ≈113.0
		Barrémien	≈129.4 - ≈125.0
		Hauterivien	≈132.9 - ≈129.4
Valanginien	≈139.8 - ≈129.4		
Berriasien	≈145.0 - ≈139.8		

**Figure 3:** Subdivision de la période Crétacé selon l'UISG.

### I-6. Contexte hydrogéologique

Nous avons dans la commune de ZOGBODOMEY, un aquifère continu à porosité d'interstice qui recèle des ressources hydrogéologiques nettement plus importantes et en général plus facile à prospector que ceux des socles. Cet aquifère se retrouve dans le bassin sédimentaire côtier (BSC) du Bénin et est un aquifère monocouche des sables du Crétacé supérieur. Il est à nappe libre au Nord et à nappe captive sous les argiles et marnes sénoniennes et maestrichtiennes au Sud, où il s'approfondit rapidement, rendant son exploitation hypothétique (ACHIDI et al, 2010).

### I-7. Caractéristiques démographiques et activités économiques

Lors du recensement général des populations et de l'habitat de 2013, la commune comptait 92.935 habitants. Son économie est essentiellement basée sur l'agriculture. Nous y rencontrons aussi d'autres activités telles que l'élevage, la pêche et l'artisanat. Notons que cette commune ainsi que les villes concernées par ce projet, constituent des zones semi-urbaines. Les principales activités économiques dans la commune de ZOGBODOMEY sont : l'agriculture, l'élevage, la pêche et la pisciculture, le commerce, l'artisanat, les transformations et stockage (ADJOVI, 2006).

➤ En ce qui concerne l'agriculture, les principales cultures sont: le maïs, le niébé l'arachide, le manioc, le coton. On cultive également le soja, le riz et les produits maraîchers. Les cultures vivrières produites sont:

- les céréales: le maïs (25% des superficies emblavées), le riz, le niébé et le soja.

- les racines et tubercules : l'igname, le manioc, la patate et le taro.
- les légumineuses : la niébé, le voandzou, le soja, le pois d'angole
- les maraichères : la tomate, le piment ; le gombo ; le sésame.

Les principales cultures de rente sont : le coton (22%), l'arachide 16%, le manioc, le palmier à huile et timidement l'ananas.

- Les espèces élevées dans la commune de ZOGBODOMEY sont les bovins, les ovins les porcins, les caprins, les lapins les volailles et les aulacodes. Malgré la prédisposition relative des ressources naturelles, le gros bétail n'a pas pu décoller à cause des habitudes sociales. Par contre, on assiste à un développement du petit élevage (petit ruminant, volailles) et de l'élevage conventionnel (auladiculture, acaniculture et cuniculture). L'élevage est à dominance de type traditionnel. Les animaux sont laissés en divagation et conduits dans la brousse. L'élevage de type moderne est pratiqué à faible échelle pour chaque espèce sauf les ovins et bovins.
- Pour la pêche, dans la zone Est à forte potentialité halieutique, il est pratiqué une pêche de cueillette individuelle sur les plans d'eau naturelle, avec la possibilité à la décrue dans les plaines d'inondations, d'utilisation des trous a poisson (piège à Dohè et à Kpokissa). Quant à la pisciculture basée sur l'élevage du tilapia, elle est développée à petite échelle (25 ares pour 117 personnes). Cependant ce potentiel est encore très peu valorisé du fait que les activités de pêche sont confrontées aux problèmes de faible productivité liés : à l'ensablement des cours d'eau dû au défrichement et l'érosion consécutive dans les bassins versants et à l'application de mauvaises techniques de pêche freinant la vitesse de l'eau (acadja) ; à l'utilisation des techniques de pêche non appropriées et prohibées à savoir les filets à mailles fines, les produits toxiques (feuilles toxiques, insecticide, etc.) ; et à la pollution des plan d'eau par les unités industrielles sur le lac Hlan.
- Les artisans dans cette commune sont essentiellement des tisserands, des maçons, des menuisiers, des mécaniciens, des forgerons, des couturiers et des coiffeuses.
- Il existe des unités de transformation traditionnelles surtout des produits vivriers. Les équipements utilisés sont de type traditionnel avec une main d'œuvre manuelle. Les types d'énergie utilisés sont : le bois et l'essence. Les produits issus de la transformation sont: huile d'arachide, galette, gari, tapioca et l'amidon pour le manioc, l'huile de palme et le

« Sodabi », l'akassa et le Lio pour le maïs. Cependant, la productivité de la plupart des activités de transformation est faible par rapport à la disponibilité relative de la matière première. Par ailleurs, il est à noter la présence d'une grande unité agro-industrielle de production d'huile végétale (ADJOVI, 2006).



## **CHAPITRE II : MATERIELS, DONNEES ET METHODES**

## **II. MATERIELS ET METHODES**

### **II-1. Matériels**

Plusieurs outils nous permettrons d'élaborer au mieux ce mémoire :

- Le logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) ArcGis 10.3.1 a été utilisé pour cartographier la zone et réaliser la carte piézométrique de l'aquifère;
- Le logiciel Autocad a été utilisé pour la réalisation de la coupe géologique ;
- Les logiciels d'informatiques bureautiques tels que le pack office (WORD, EXCEL) pour traiter les données collectées et rédiger le mémoire.

### **II-2. Méthodologie de travail**

Pour mener à bien ce travail, la démarche méthodologique adoptée se présente comme suit :

#### **II-2-1. Phase de recherche documentaire et de collecte des données**

Durant cette phase, il a été question de rechercher toutes les informations, les documents scientifiques, les revues et les documents administratifs en rapport avec notre travail et qui nous permettrons de mener à bien notre étude. Elle a consisté à:

- prendre en compte l'ensemble des données existantes (les logs stratigraphiques des nouveaux forages dudit projet, les résultats d'analyses physico-chimiques et bactériologiques du laboratoire central d'analyse d'eau de la SONEB);
- utiliser les données pluviométriques et climatiques de la station synoptique de Bohicon recensées par l'ASECNA;
- obtenir les données piézométriques de la commune de ZOGBODOMEY à la Direction Générale-Eau du Bénin.

#### **II-2-2. Phase du traitement des données**

##### **II-2-2-1. Présentation des différentes méthodes d'estimation de la recharge des eaux souterraines et choix des méthodes appropriées**

Les estimations de la recharge des eaux souterraines constituent un apport fondamental pour la plupart des approches utilisées pour évaluer et gérer les ressources en eaux souterraines. La plupart des approches de quantification de la recharge des nappes souterraines mesurent la

recharge directement ou indirectement sur une zone limitée (échelle ponctuelle ou à petite échelle) et sur de courtes périodes. L'estimation de la recharge, quelle que soit la méthode, est généralement sujette à de grandes incertitudes et erreurs. Nombreuses sont les méthodes disponibles pour l'estimation de la recharge naturelle et artificielle de l'aquifère ; leur sélection dépend des données disponibles, des conditions géographiques et topographiques locales, de l'échelle spatiale et temporelle requise et de la fiabilité des résultats obtenus par différentes méthodes (Roohul Khan et al, 2016).

### **1) Méthode de la fluctuation de la nappe phréatique (Water table fluctuation)**

Dans l'application de la méthode de fluctuation de la nappe phréatique, l'hypothèse de base est que l'élévation du niveau de la nappe phréatique dans un aquifère non confiné n'est due qu'à l'alimentation en eau parvenant à la nappe phréatique. La méthode de fluctuation de la nappe phréatique ne s'applique qu'aux aquifères libres et ne permet pas de comptabiliser un taux de recharge constant.

### **2) Méthode du bilan hydrique (Water budget method)**

Les méthodes de bilan hydrique sont celles qui sont basées sur l'équation du bilan hydrique. Tous les autres paramètres, à l'exception de la recharge, peuvent être mesurés ou estimés. Cette méthode peut être adoptée pour une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Cependant, cette approche a pour principale limitation que la précision des estimations de la recharge dépend de la précision avec laquelle les autres composantes de l'équation du bilan d'eau sont mesurées.

### **3) Loi de Darcy**

La loi de Darcy stipule que les flux de fluide tels que la recharge dans un système aquifère peuvent être calculés si les gradients et les conductivités hydrauliques sont connus. L'application de la loi de Darcy nécessite des mesures ou des estimations du gradient vertical total et de la conductivité hydraulique non saturée à la teneur en eau sol / eau ambiante.

### **4) Relations empiriques**

Des relations empiriques peuvent également être développées entre la recharge des eaux souterraines et les précipitations sur la base d'études d'équilibre saisonnier des eaux souterraines. Kumar et Seethapathi (2000) ont fait une de ces tentatives dans la zone de commandement du canal du Haut-Gange. Une relation empirique a été suggérée pour estimer la recharge des nappes souterraines en ajustant les valeurs estimées de recharge des précipitations et les valeurs



correspondantes des précipitations pendant la mousson par le biais des techniques de régression non linéaire.

### **5) Modèles numériques d'un aquifère**

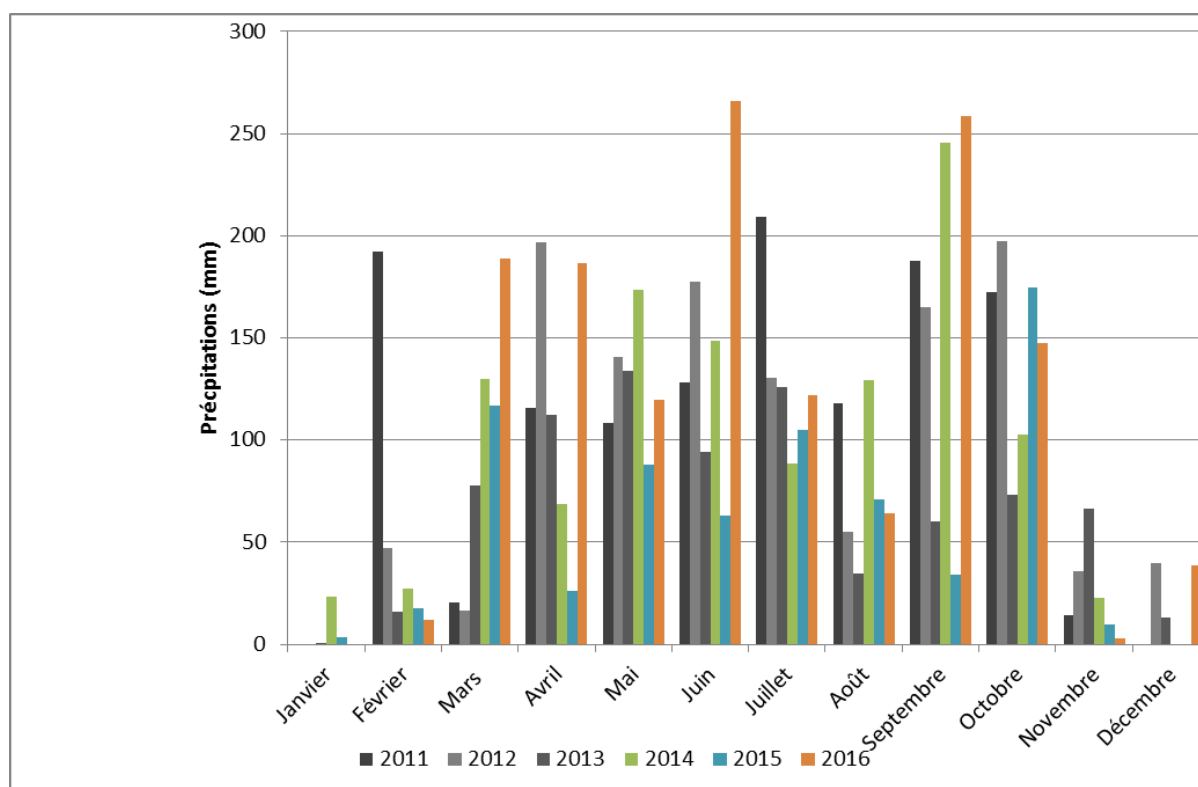
Les mesures de recharge sur le terrain contiennent encore une quantité d'incertitudes appréciables et de nombreuses études sur le sujet sont en cours. Parallèlement à la diversité des méthodes utilisées pour effectuer des mesures sur le terrain, les enquêteurs ont utilisé des modèles numériques d'eau souterraine pour estimer la recharge. Les modèles peuvent également être utilisés pour prédire la distribution de la recharge à des échelles temporelles et spatiales basées sur les propriétés géologiques et le taux de recharge (Sanford, 2002).

Au vu de toutes ces méthodes et compte tenu de la nature confinée de l'aquifère qui fait l'objet de ce travail, nous choisissons la méthode du bilan hydrique et les relations empiriques. Mais compte tenu des conditions d'utilisation de chacune des méthodes et des paramètres qu'elles prennent en compte, nous retenons la méthode du bilan hydrique pour estimer la recharge de la nappe.

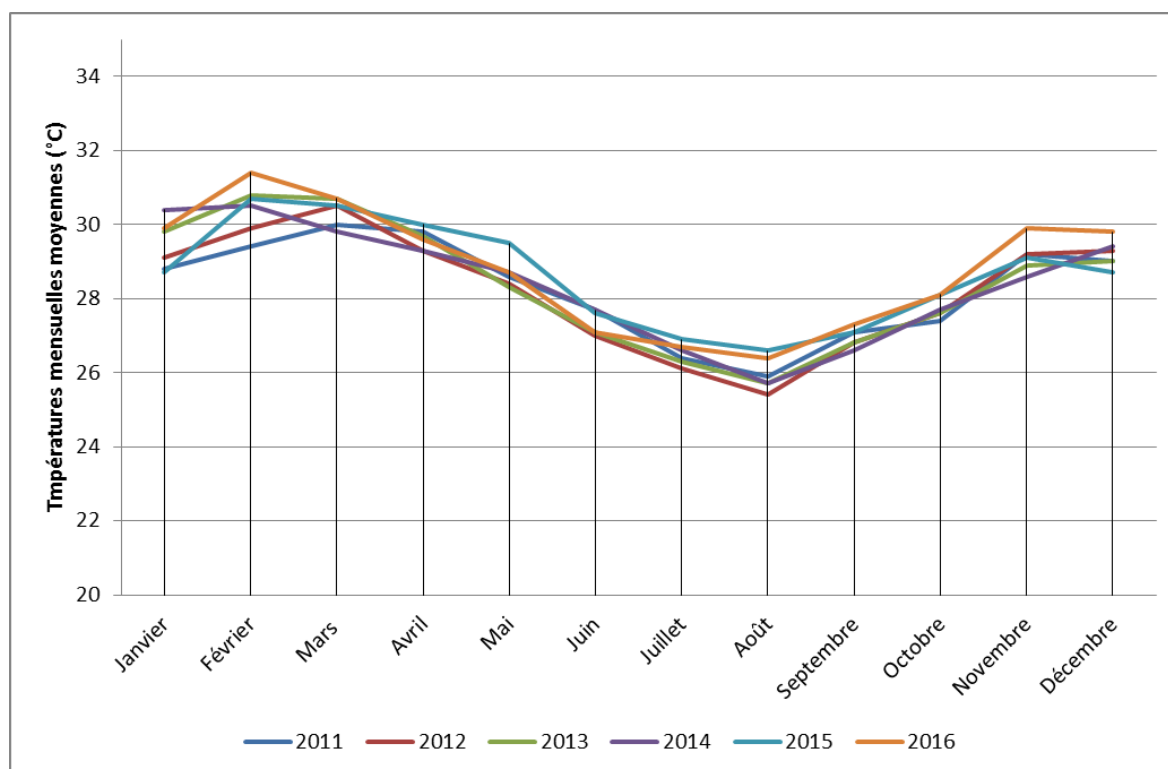
#### **II-2-2-2. Données pluviométriques mensuelles et températures mensuelles**

Nous voudrions estimer la recharge sur les cinq dernières années dans la commune de ZOGBODOMEY car le projet de renforcement du système d'AEP des villes d'Abomey, Bohicon et environs est basé sur l'exploitation de la ressource en eau souterraine de cette commune. Mais faute de données, nous allons considérer les données pluviométriques de la station synoptique de Bohicon, qui se trouve à une 40 km du site sur la période de 2011 à 2016. A Bohicon, pour les années 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 et 2016, il a été mesuré respectivement 1266,3 mm ; 1201,6 mm, 807,8 mm, 1161,1 mm, 709,6 mm et 1406,8 mm de pluie (ASECNA). La moyenne annuelle pour ces six années est de 1092,2 mm.

Les figures ci-dessous montrent les précipitations mensuelles de ces six années et leurs températures mensuelles. Ces données sont consignées en **annexe N°1**.



**Figure 4:** Pluviométries mensuelles de 2011 à 2016 (Climatologie\_Statistiques sur la climatologie - Benin Data Portal , 2017).



**Figure 5:** Températures mensuelles de 2011 à 2016 ([www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)).

### II-2-2-3. Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est le rapport du volume ruisselé (issu de l'écoulement de surface uniquement) sur le volume de la pluie tombée pendant une période donnée (l'épisode pluvieux, le mois, l'année). Le coefficient de ruissellement  $C_r$  dépend essentiellement du type de sol, de sa couverture végétale et de la pente du bassin versant. En fonction de la nature superficielle de notre zone, nous prenons  $C_r = 0,20$  car notre zone est constituée de prés et champ cultivés. ( KARAMBIRI, 2008) . Ce coefficient nous permettra de calculer la lame d'eau ruisselée.  $L_r$  désigne la lame d'eau ruisselée (mm).

On a :

$$C_r = \frac{L_r}{P_m} \quad (1)$$

Donc on obtient :

$$L_r = C_r \times P_m \quad (2)$$

Avec :  $P_m$  : Pluie moyenne (mm)

### II-2-2-4. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration est la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et de la transpiration végétale. Ce paramètre varie en fonction de la température, du type de végétation, du vent, de l'époque de l'année, du rayonnement, de l'état hydrique du sol. Nous tiendrons compte ici du rayonnement pour l'évaluer et ZOGBODOMEY n'étant qu'à quelques kilomètres de Bohicon, nous utiliserons les données de la station de Bohicon pour le rayonnement.

La formule empirique de TURC sera utilisée pour l'évaluer :

$$ETP = 0,4 \frac{T_m}{T_m + 15} (I_g + 50) \quad (3)$$

Avec :

$ETP$  : évapotranspiration potentielle (mm/mois) ;

$T_m$  : température moyenne mensuelle ( $^{\circ}C$ ) ;

$I_g$  : rayonnement moyen mensuel ( $cal/cm^2/j$ ). (Weather Spark)

Le coefficient **0,4** est valable pour les mois à 30 ou 31 jours. Ce coefficient est à remplacer par **0,37** pour le mois de février.

### II-2-2-5. L'évapotranspiration réelle (ETR)

Ici, on utilisera le bilan de Thornthwaite. Thornthwaite est le concepteur d'un algorithme permettant de calculer la recharge. Cet algorithme est le suivant (Jaunat, 2012) :

- Si  $P > ETP$ , alors  $ETR = ETP$ . S'il reste un excédent ( $P - ETP$ ), il est affecté à la RFU si nécessaire et à l'écoulement (et/ou l'infiltration) quand la RFU est complète.
- Si  $P < ETP$ , alors toute la pluie est évaporée et la RFU est diminuée, jusqu'à la vider si besoin, de l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETP. Dans ce cas l'écoulement (et/ou l'infiltration) est nul.

La RFU est fonction de la RU. La réserve utile se calcule par la formule :

$$RU(cm/m) = \theta_{FC} - \theta_{WP} \quad (4)$$

En absence de données comme dans notre cas, on peut utiliser les valeurs ci-après:

**Tableau 1:** Valeur de la RU en fonction du type de sol (A. Keïta, 2009).

Selon Israelson et Hansen (1967)		Selon Withers et Vipond (1974)	
Type sol	RU (mm/m)	Type sol	RU (mm/m)
Sableux	70-100	Sableux	55
Sablo-limoneux	90-150	Sable fin	80
Limoneux	140-190	Sablo-limoneux	120
Argilo-limoneux	170-220	Argilo-limoneux	150
Limono-argileux	180-230	Argileux	235
Argileux	200-250		

$$RFU = \frac{2}{3} \times RU \times Z_r \quad (5)$$

Avec :

*ETP* : L'évapotranspiration potentielle,

*RFU* : Réserve facilement utilisable

*R*: Le ruissellement

*Z<sub>r</sub>* : Profondeur d'enracinement (m)

*θ* : Humidité en % de volume de sol.

Dans notre zone, nous sommes en présence d'argile latéritique et nous prenons la **RU = 235 (cm/mm)**.

La plus grande profondeur d'enracinement selon les cultures en place est de  $Z_r = 1,5m$  et cela est dû à la culture du maïs. Nous avons donc une **RFU = 235 mm**.

#### II-2-2-6. La pluie efficace

La pluie efficace est cette partie de la précipitation qui englobe la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau infiltrée dans le sol.

$$P_{eff} = L_r + I \quad (6)$$

Soit :

$$P_{eff} = (C_r \times P_m) + I \quad (7)$$

Avec :

*P<sub>eff</sub>* : Pluie efficace (mm) ;

*P<sub>m</sub>* : Pluie moyenne (mm) ;

*C<sub>r</sub>* : Coefficient de ruissellement ;

*I* : Infiltration (mm)

#### II-2-2-7. Evaluation de la lame d'eau infiltrée (recharge naturelle directe)

La lame d'eau infiltrée correspond à la hauteur d'eau infiltrée dans le sol que multiplie le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. Cette lame d'eau correspondra à la recharge naturelle directe de la nappe.

Plus haut, nous avons vu que la méthode de bilan hydrique est celle qui est basée sur l'équation qui se présente comme suit :

$$P_m = ETR + I + L_r + \Delta s \quad (8)$$

Avec :

$P_m$  : Pluie mensuelle (mm) ;

$ETR$  : Evapotranspiration réelle (mm) ;

$L_r$  : Lamme d'eau ruisselée (mm) ;

$I$  : Lamme d'eau infiltrée ;

$\Delta s$  : Réserve facilement utilisable (mm).

La résolution de cette équation nous permettra d'obtenir la valeur de cette recharge, tout en respectant l'algorithme de Thornthwaite.

### II-2-2-8. Vitesse d'infiltration

La vitesse d'infiltration  $V_i$  est la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol par unité de temps. On l'obtient par l'équation suivante (Anne-Paule ETRILLARD 1994):

$$V_i = \frac{I}{T} \quad (9)$$

Avec :

$I$  : Lamme d'eau infiltrée (mm) ;

$T$  : Durée de la période (s) ;

$V_i$  : Vitesse d'infiltration (mm/s).

## II-3. Hydrogéologie du milieu

### II-3-1. Coupe lithologique du sol

La lithologie est la nature des roches formant un ensemble, ou couche géologique. On évoque ainsi la lithologie d'un échantillon de roche, aussi bien que celle d'une formation géologique ou de tout un massif montagneux. Ainsi, la coupe lithologique nous permettra de voir la structuration des formations géologiques en place afin de situer notre aquifère.

Pour obtenir la coupe lithologique de notre zone d'étude, nous allons utiliser la méthode de l'interpolation géométrique sur du papier millimétré puis faire le schéma obtenu à l'aide du logiciel Autocad. Elle s'effectue généralement en quatre étapes (Edwards 2018) :

- Tracer les corrélations stratigraphiques des horizons à partir des données disponibles (colonnes lithologiques),
- Extrapoler/interpoler leur géométrie,
- Définir la conformité des unités, l'agencement des sédiments (couches) dans chaque unité et leurs relations avec les limites de ces unités,
- Remplir les couches.

Nous le ferons sur la base des logs stratigraphiques des huit nouveaux forages en regroupant les sols suivant leur nature.

### **II-3-2. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère**

La fonction d'un aquifère est d'emmagasiner les eaux souterraines, en régulant le stockage et la libération de l'eau. Les paramètres hydrodynamiques sont des indices qui définissent l'aptitude de l'aquifère à récupérer et à délivrer l'eau. Ils sont indispensables pour connaître l'aquifère et ses volumes d'eau exploitables par un puits. Ces paramètres sont : la transmissivité  $T$  et l'emmagasinement  $S$ .

- La productivité d'un captage dans un aquifère, soit le débit que peut capter un forage, est fonction de son coefficient de perméabilité ( $k$  en  $m/s$ ) et de son épaisseur mouillée. Ce paramètre est appelé transmissivité ( $T$  en  $m^2/s$ ). La transmissivité d'un aquifère représente la capacité d'un aquifère à mobiliser l'eau qu'il contient. Elle se détermine lors de pompages d'essai.
- Le coefficient d'emmagasinement ( $S$ ) représente la quantité d'eau libéré sous une variation unitaire de la charge hydraulique, c'est-à-dire sous l'effet d'une baisse du niveau d'eau. Il conditionne l'emmagasinement de l'eau souterraine mobile dans les vides du réservoir. Il est utilisé pour caractériser plus précisément le volume d'eau exploitable par un forage et se détermine lors de pompages d'essai et d'essais géotechniques.

Le dossier technique des nouveaux forages réalisés nous renseigne sur les valeurs des paramètres énumérés ci-dessus après les essais de pompage réalisés au niveau des huit nouveaux forages (**annexe N°2**). Mais ces seules valeurs ne peuvent pas être représentatives de l'aquifère ; néanmoins, pour la suite des travaux, nous allons considérer le coefficient d'emmagasinement obtenu. Le tableau qui suit présente ces différentes valeurs :

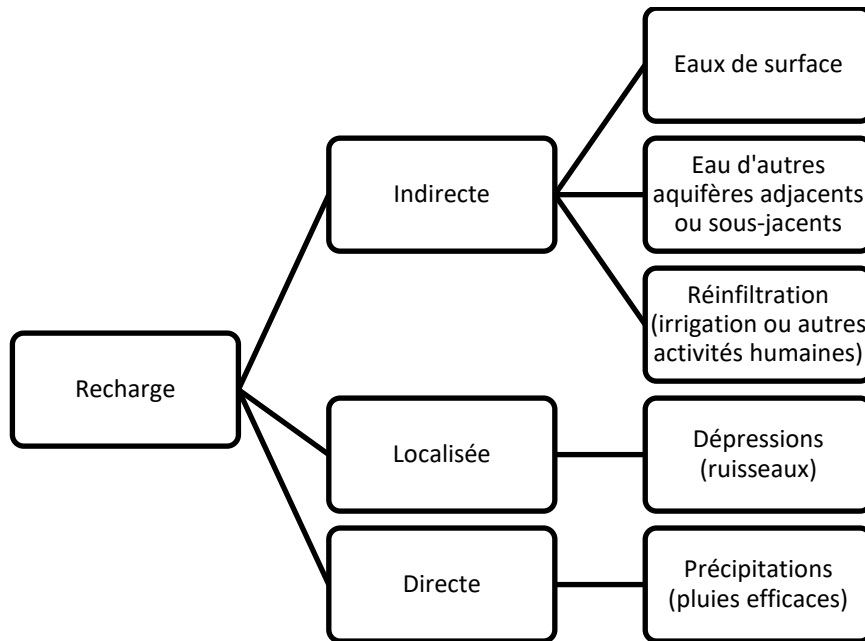
**Tableau 2:** Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.

<b>Caractéristiques hydrodynamiques</b>	<b>Transmissivité T</b> (m <sup>2</sup> /s)	<b>Perméabilité k</b> (m/s)	<b>Emmagasinement</b> (%)
<b>Valeurs</b>	0,5	0,01	0,5

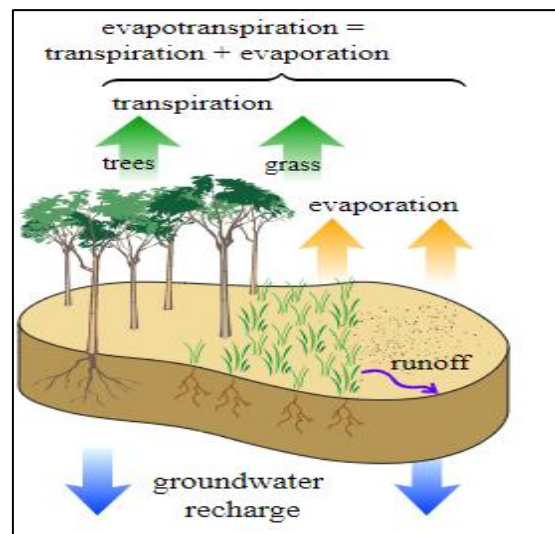
### **II-3-3. Les différents types de recharge**

La recharge naturelle des aquifères ou infiltration résulte naturellement d'un processus hydrologique par lequel les eaux de surface et les pluies percolent à travers le sol et s'accumulent sur le premier horizon imperméable rencontré. On distingue trois types de recharge pour différentes origines. Cependant, la définition ci-dessus ne concerne que les apports « naturels » d'eau et ne prend pas en compte les apports indirects, souvent anthropiques. Dès lors, une définition plus globale serait que la recharge correspond à la quantité d'eau qui rejoint l'aquifère et qui participe à son renflouement. Les figures ci-dessous montrent respectivement les principes de recharge directe et indirecte puis le mécanisme de la recharge directe.





**Figure 6:** Les principes de recharge directe et indirecte.



**Figure 7:** Mécanisme de la recharge directe.

#### II-4. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est l'étude de la façon dont l'incertitude de la sortie d'un code ou système (numérique ou autre) peut être attribuée à l'incertitude dans ses entrées. Il s'agit d'estimer des indices de sensibilité qui quantifient l'influence d'une entrée ou d'un groupe

d'entrée sur la sortie. Pour le cas présent, le groupe d'entrée est constitué de la pluviométrie, la température, l'ETR et la vitesse d'infiltration. La recharge est donc prise comme la sortie.

Afin de pouvoir évaluer ces indices, nous avons réduit l'échantillon des données en retirant tous les mois où la recharge est nulle et nous avons fait la moyenne des indices pour chaque paramètre d'entrée afin de quantifier leurs influences sur la recharge de 2011 à 2016. On se retrouve alors avec un échantillon de vingt-six individus et cinq variables.

- Soit  $S_p$ ,  $S_t$ ,  $S_{ETR}$ , et  $S_{Vi}$  les sensibilités respectives de la pluviométrie par rapport à la recharge, de la température par rapport à la recharge, de l'ETR par rapport à la recharge et de la vitesse d'infiltration par rapport à la recharge.
- Soit  $Y$  la sortie et  $X = (X_p, X_t, X_{ETR}, X_{Vi})$  l'entrée. On a alors une fonction de type  $Y = f(X)$ . Ces indices sont calculés comme suit :

$$S_i = \frac{X_i}{Y} \cdot \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad (10)$$

Avec  $i = \{P, T, ETR, Vi\}$ .

## II-5. Analyse prévisionnelle

Nous avons estimé la recharge en utilisant les lois de régression, sur la base des sommes annuelles des recharges de 2011 à 2016.

Les prévisions de la recharge nous permettront d'évaluer le ratio prélèvement/recharge à l'horizon du projet nous permettrait de connaître l'état de l'aquifère (surexploité ou non).

## II-6. Evaluation des besoins en eau à l'horizon du projet (2030)

Le projet qui justifie la présente étude couvre plusieurs localités du département du ZOU (Abomey, Bohicon et leurs environs). Ces zones comptent au total une population de 264.047 habitants avec un taux d'accroissement de 3,2% selon le RGPH-4 de 2013 (INSAE, 2016).

Nous évaluerons la population à l'horizon 2030 (horizon du projet) selon l'équation suivante :

$$P_n = P_0 \times (1 + ta)^{n-n_0} \quad (14)$$

Avec :

$P_n$  : Population à l'horizon du projet ;

$t_a$  : Taux d'accroissement de la population ;

$(n, n_0)$  : Année de fin et année de départ.

## **II-7. Analyse de la qualité de l'eau**

L'eau destinée à la consommation humaine et aux usages domestiques habituels doit être potable. Face aux multiples facteurs de risque de pollution (la pollution microbiologique et la pollution liée aux habitudes des populations de la région), la présente étude vise à évaluer la qualité de l'eau et les risques de pollution de l'aquifère de ZOGBODOMEY qui est exploité pour l'alimentation en eau potable des populations. Pour cela, nous allons :

- Exploiter la fiche d'analyses bactériologiques et physico-chimiques du dossier technique des forages pour relever les différentes infections de l'eau de la nappe de l'aquifère;
- Identifier les différentes habitudes des populations pouvant engendrer la pollution de l'aquifère et leur mode d'impact sur l'aquifère ;
- Proposer des approches de solutions.



**CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### III-1. Hydrologie de surface du milieu

##### III-1-1. L'évapotranspiration potentielle

L'évaluation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) s'est faite à partir des données pluviométriques mensuelles de notre zone d'étude suivant la formule de TURC. Sont consignées dans le tableau suivant, les différentes valeurs de l'ETP pour chaque mois de l'année :

**Tableau 3:** Evaluation de l'ETP

Mois	ETP (mm)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	126,30	126,74	127,77	128,62	126,15	127,91
Février	115,54	116,19	117,34	116,96	117,22	118,08
Mars	116,58	117,22	117,47	116,32	117,22	117,47
Avril	116,32	115,66	116,19	115,66	116,58	116,06
Mai	112,45	112,18	112,04	112,5	113,64	112,58
Juin	113,44	112,42	112,56	113,44	113,29	112,56
Juillet	115,90	115,42	115,74	116,22	116,69	116,37
Août	119,45	118,60	119,11	119,11	120,62	120,29
Septembre	119,21	118,74	118,74	118,42	119,21	119,52
Octobre	117,45	117,75	117,75	117,90	118,50	118,50
Novembre	124,62	124,62	124,18	123,74	124,47	125,62
Décembre	128,86	129,32	128,86	129,46	128,41	130,05

On constate que les mois de Novembre, Décembre et Janvier sont les mois de l'année où on observe les plus grandes valeurs d'évapotranspiration.

### III-1-2. La pluie efficace

Après l'évaluation de l'ETP, nous avons déduit la valeur de la pluie efficace pour chaque mois en nous basant sur l'algorithme de Thornwaite. Ces valeurs sont renseignées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 4:** Evaluation de la pluie efficace.

Mois	Pluie efficace (mm)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	–	–	–	–	–	–
Février	76,45	–	–	–	–	–
Mars	–	–	–	13,77	–	71,42
Avril	–	81,33	–	–	–	70,63
Mai	–	28,21	21,85	61,11	–	6,91
Juin	14,45	65,17	–	35,35	–	153,43
Juillet	93,39	15,27	10,25	0	–	5,82
Août	–	–	–	10,28	–	–
Septembre	68,58	46,15	–	126,77	–	138,97
Octobre	54,64	79,34	–	–	55,99	28,69
Novembre	–	–	–	–	–	–
Décembre	–	–	–	–	–	–
Total:	307,53	315,51	32,10	247,30	55,99	475,89

Nous constatons qu'il y a beaucoup plus d'évapotranspiration que de pluie efficace en une année. Ceci s'explique par le fait que nous sommes en présence d'un grand couvert végétal dans notre zone d'étude. L'**annexe N°3** présente les différentes valeurs de la RFU.

### III-1-3. Evaluation de la lame d'eau infiltrée (recharge naturelle directe)

La lame d'eau infiltrée (infiltration) traduit le phénomène de recharge et correspond au passage de l'eau à travers la surface du sol, de sa pénétration dans le sol et de son mouvement descendant dans la zone non saturée du sous-sol. Connaissant le coefficient de ruissellement, nous avons calculé la lame d'eau infiltrée en évaluant la lame d'eau ruisselée pour chaque mois. Nous pouvons donc lire dans le tableau ci-dessous, ces différentes valeurs :

**Tableau 5:** Evaluation de la lame d'eau infiltrée par la méthode du bilan hydrique.

Mois	Infiltration (mm)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	–	–	–	–	–	–
Février	61,16	–	–	–	–	–
Mars	–	–	–	11,021	–	57,13
Avril	–	65,06	–	–	–	56,51
Mai	–	22,57	17,48	48,88	–	5,52
Juin	11,56	52,14	–	28,28	–	122,74
Juillet	74,71	12,22	8,20	–	–	4,65
Août	–	–	–	8,22	–	–
Septembre	54,86	36,92	–	101,42	–	111,17
Octobre	43,71	63,47	–	–	44,79	22,95
Novembre	–	–	–	–	–	–
Décembre	–	–	–	–	–	–
Total:	246,02	252,40	25,68	197,84	44,79	380,71

On remarque en comparant les pluies efficaces aux infiltrations, que le ruissellement est inférieur à l'infiltration. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'un grand couvert végétal et les faibles pentes du terrain naturel, ce qui favorise la diminution de l'eau ruisselée. Ces quantités d'eau infiltrées sont prises égales aux recharges.

En terme de volume, pour ces différentes années, nous avons les valeurs suivantes comme recharge annuelle de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY en tenant compte d'un coefficient d'emmagasinement égal à  $5.10^{-3}$  :

**Tableau 6:** Quantification du volume d'eau stocké par année.

Années	Recharge annuelle (mm)	Volume d'eau stocké ( $10^6.m^3$ )
2011	246,03	1,02
2012	252,41	1,04
2013	25,69	0,11
2014	197,84	0,815
2015	44,79	0,19
2016	380,72	1,57

### III-1-4. Vitesse d'infiltration

Après la quantification des infiltrations, nous avons procédé au calcul des vitesses d'infiltration. Le tableau ci-dessous présente ces différentes valeurs de vitesse d'infiltration :

**Tableau 7:** Calcul des vitesses d'infiltration.

Mois	Vitesse d'infiltration (mm/s)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Février	0,000142	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Mars	0,000000	0,000000	0,000000	0,000013	0,000000	0,000132
Avril	0,000000	0,000075	0,000000	0,000000	0,000000	0,000093
Mai	0,000000	0,000020	0,000016	0,000051	0,000000	0,000005
Juin	0,000010	0,000050	0,000000	0,000033	0,000000	0,000109
Juillet	0,000086	0,000012	0,000009	0,000000	0,000000	0,000004
Août	0,000000	0,000000	0,000000	0,000011	0,000000	0,000000
Septembre	0,000049	0,000033	0,000000	0,000098	0,000000	0,000068
Octobre	0,000036	0,000049	0,000000	0,000000	0,000040	0,000024
Novembre	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Décembre	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Ces valeurs sont en moyenne de l'ordre de  $10^{-5}$  mm/s.



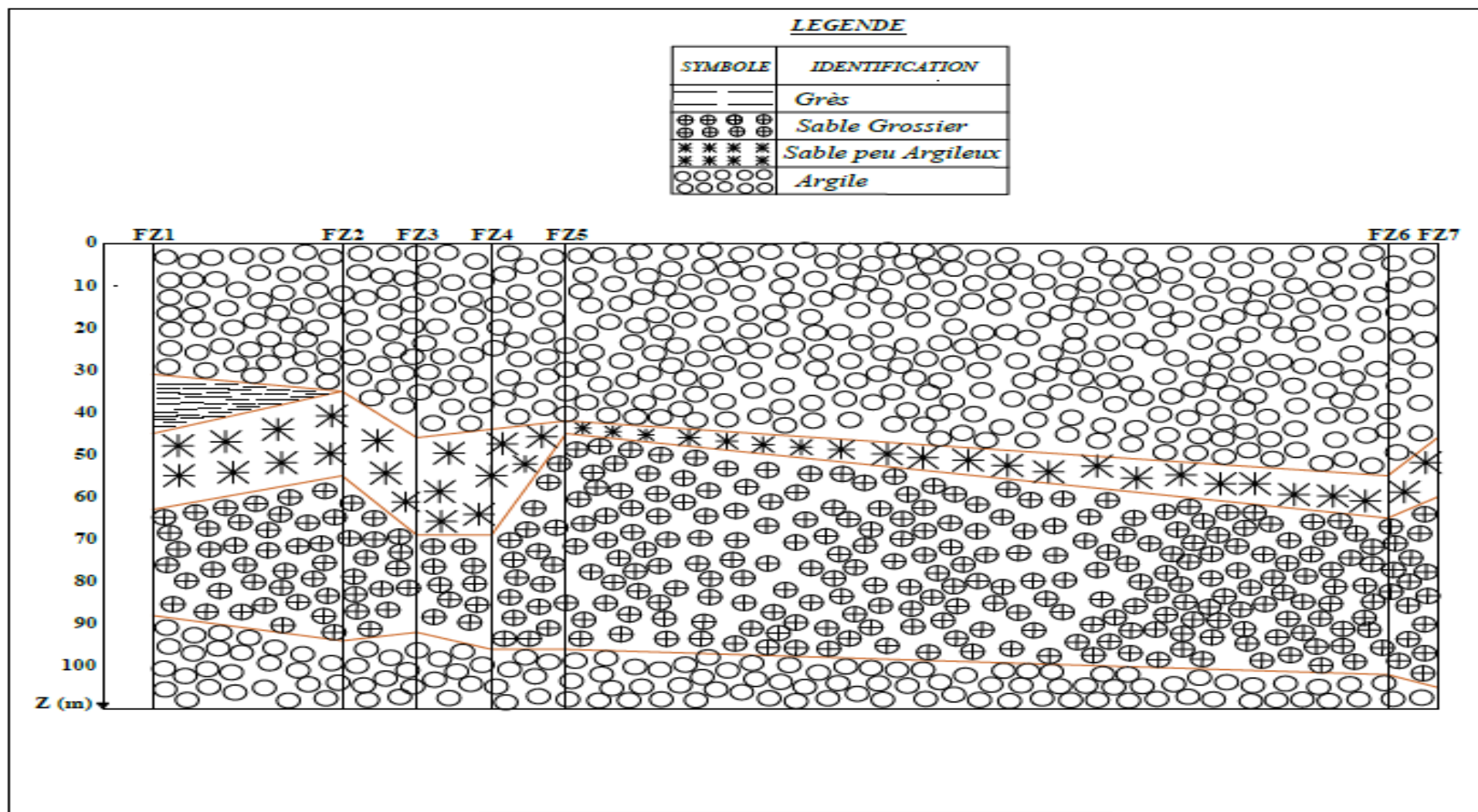
## III-2. Hydrogéologie du milieu

### III-2-1. Coupe lithologique du sol

La réalisation des huit (08) nouveaux forages nous a permis d'avoir pour chacun d'eux un log stratigraphique du sous-sol en présence. Afin de mieux situer la position de l'aquifère dans le sous-sol, il est donc nécessaire d'avoir une idée de la coupe géologique de notre milieu. La corrélation stratigraphique des huit (08) forages nous a donc permis d'obtenir la coupe géologique AA' ci-dessous. Les figures ci-après désignent respectivement la localisation des huit nouveaux forages et la coupe géologique de l'aquifère :



**Figure 8:** Localisation des huit nouveaux forages.



**Figure 9:** Coupe géologique de la zone d'étude.

On voit bien sur cette coupe la nature captive et artésienne de l'aquifère et qu'il se situe dans la couche de sable grossier à moyen.

Les potentielles zones de recharge de cet aquifère n'ont pas pu être ressorties sur la coupe géologique car nous n'avons pas assez d'informations pouvant permettre d'avoir une vue plus large de la zone d'étude. En **annexe N°4**, nous retrouvons les logs stratigraphiques des forages.

### III-3. Analyse de sensibilité

Le tableau ci-dessous présente la moyenne des indices de sensibilité des paramètres d'entrée par rapport à la recharge de 2011 à 2016 :

**Tableau 8:** Indices de sensibilité.

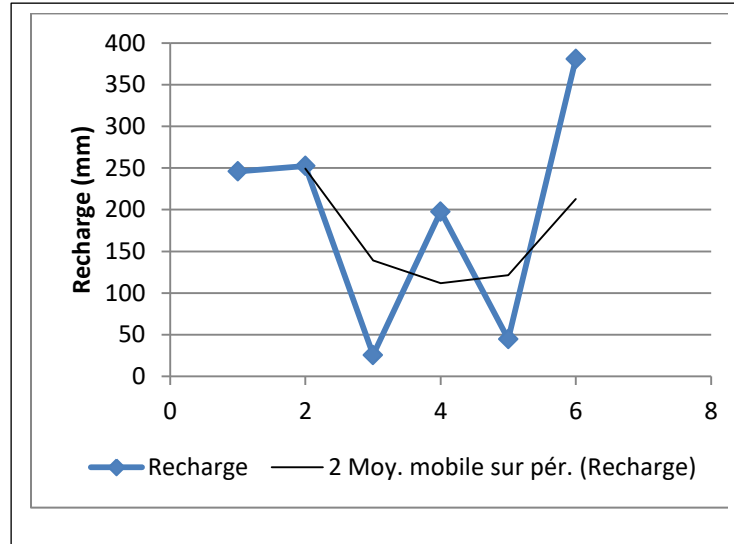
	$S_p$	$S_t$	$S_{ETR}$	$S_{Vi}$
<b>Moyenne</b>	5,77	37,04	-4602,66	0,94

Au vu de ces résultats, nous pouvons dire qu'une variation de 1% de la pluviométrie entraîne une variation de 5,77% de la recharge et une variation de 1% de la vitesse d'infiltration entraîne une variation de 0,94% de la recharge. La moyenne concernant l'ETR attire particulièrement l'attention car on voit qu'une variation de 1% de l'ETR entraîne une variation négative de -4602,66% de la recharge. On peut donc conclure qu'une augmentation de 1% de l'ETR cause une baisse de -4602,66% de la recharge. Quant à la température, une variation de 1% de la température entraîne une variation de 37,04% de la recharge.

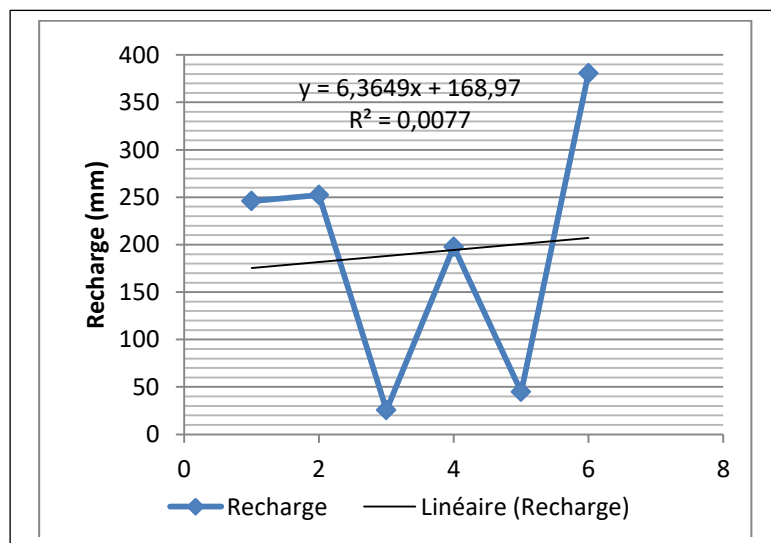
De tout ce qui précède (ACP, analyse de sensibilité), nous pouvons dire que l'ETR non seulement d'être fortement corrélée à la recharge, est le paramètre qui influence le plus la recharge de l'aquifère. L'**annexe N°5** présente les différentes valeurs des indices de sensibilité.

### III-4. Analyse prévisionnelle

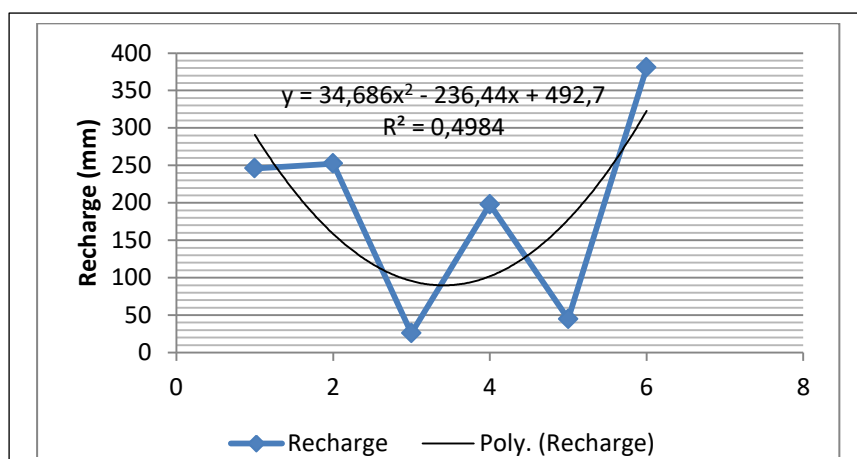
Les figures ci-dessous montrent trois lois de régression à savoir respectivement la moyenne mobile, la droite de régression linéaire et la régression polynomiale, appliquées aux données des recharges annuelles.



**Figure 10:** Moyenne mobile



**Figure 11:** Droite de régression linéaire.



**Figure 12:** Régression polynomiale.

Nous constatons que la moyenne mobile ne nous permet pas d'avoir une équation, donc nous ne saurons exploiter méthode. Nous allons donc estimer la recharge avec les équations des deux autres méthodes puis les comparer afin de retenir l'estimation de la recharge la plus plausible. Les équations respectives de la régression polynomiale et de la droite de régression linéaire sont les suivantes :

$$Y = 34,686x^2 - 236,44x + 492,7 \quad (11)$$

$$Y = 6,3649x + 168,97 \quad (12)$$

L'année 2030 représente la vingtième année (2011 à 2030) donc pour  $x = 20$ , nous avons  $Y = 296,27$  (méthode de la droite de régression linéaire) et  $Y = 9638,3$  (méthode de la régression polynomiale). Bien que le  $R^2$  de la régression polynomiale (aussi insignifiante soit elle) soit supérieur au  $R^2$  de la régression linéaire, la valeur de la recharge estimée par la loi de régression linéaire semble la plus plausible que celle obtenue avec la régression polynomiale. Nous estimons donc la recharge annuelle à **296,27 mm** en 2030. Cette recharge ramenée en volume par rapport à la surface de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY, correspond à **1,22.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>**. Toutefois, la recharge peut varier dans le temps car la recharge estimée pour l'année 2030 n'est faite que sur la base des données à caractère saisonnier dont nous disposons.

### III-5. Evaluation des besoins en eau à l'horizon du projet (2030)

Les tableaux suivants présentent respectivement l'estimation de la population à l'horizon du projet et l'évaluation des besoins en eau de la population.

**Tableau 9:** Estimation de la population à l'horizon 2030.

	Bohicon	Abomey	Total
Population (2013)	171781	92266	264047
Population (2030)	293447	157615	451062

**Tableau 10:** Estimation des besoins en eau de la population à l'horizon 2030.

Besoins en eau domestiques (m <sup>3</sup> /s)	Besoins en eau des services publics (m <sup>3</sup> /s)	Débit d'adduction (m <sup>3</sup> /s)	Débit de distribution (m <sup>3</sup> /s)
0,21	0,084	1,68	2,65

Si nous considérons le débit de distribution comme étant le prélèvement dans l'aquifère, alors ce prélèvement est de 83.605.195,6 m<sup>3</sup> en 2030.

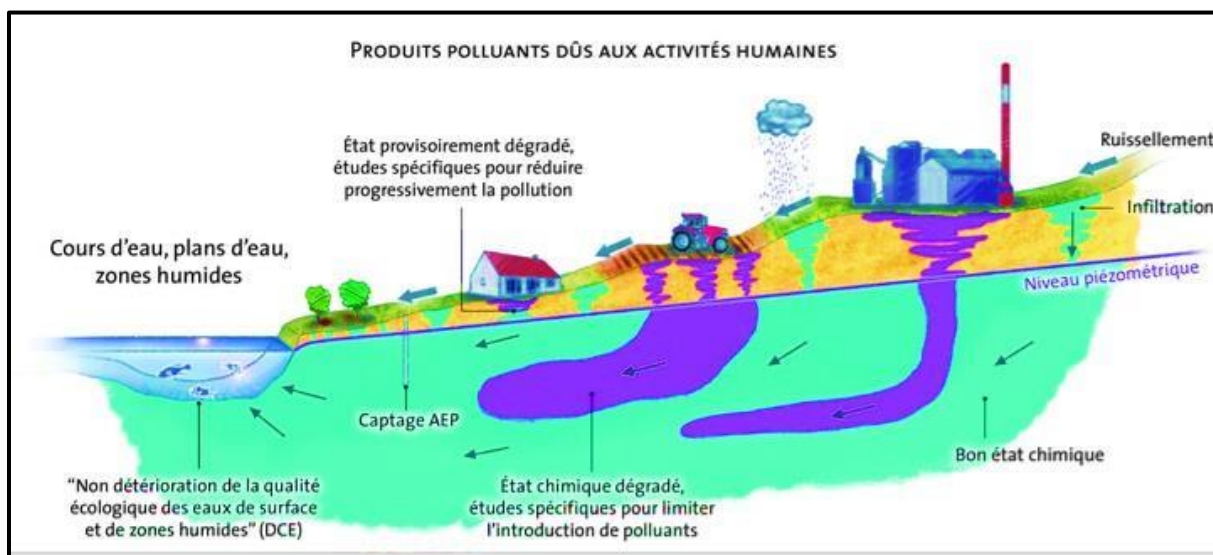
Le ratio prélèvement/recharge est alors dépasse de trop la valeur 1. Ceci traduit l'infériorité de la recharge par rapport aux prélèvements. Par conséquent, l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY à l'horizon du projet serait surexploité.

En **annexe N°6**, nous avons l'évaluation des besoins en eau de la population.

### III-6. Analyse de la qualité de l'eau

La pollution d'une nappe d'eau destinée à alimenter des populations en eau potable, expose ces derniers à des maladies pathogènes suite à la consommation de l'eau provenant de cette nappe. Plusieurs facteurs expliquent la pollution des eaux souterraines. La figure ci-dessous illustre entre autre les habitudes pouvant causer une quelconque pollution de la nappe. Il est donc nécessaire d'effectuer des analyses physico-chimiques et bactériologiques de l'eau de la

dite nappe afin de connaître ses propriétés physiques et sa composition chimique pour appréhender quel type de traitement il faut apporter à cette eau pour la rendre conforme à la consommation humaine selon les normes de l'OMS et du pays concerné, en l'occurrence le Bénin pour notre cas.



**Figure 13:** Illustration des modes de pollution (SIGES, 2019).

### III-6-1. Analyses physico-chimiques et bactériologiques

La nappe d'eau de l'aquifère de crétacé étant rechargée naturellement, on peut dire que s'il y a contamination, elle pourrait provenir de la surface. Les Coliformes fécaux des streptocoques fécaux, et les E. coli qui sont considérés comme plus appropriés de révéler des contaminations fécales sont absents dans les eaux des forages artésiens en saison sèche. Les huit (08) forages de cet projet ont été réalisés pendant une saison sèche d'où l'absence de ces bactéries dans les échantillons d'eau prélevés au niveau de ces forages. En analysant les valeurs obtenues après les analyses physico-chimiques et bactériologiques, on remarque que les ions nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) sont dans les normes.

Le pH de l'eau est très bas et ne tourne pas autour de la valeur 7 même à l'équilibre carbonique. L'alcalinité complète (T.A.C) est basse donc la concentration des ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) est très basse. Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y sont insuffisants.

Tout ceci explique la faible conductivité des échantillons d'eau de cet aquifère (< 7,7). Par contre, la turbidité et la température de nos échantillons sont dans les normes. On peut donc conclure que le parcours souterrain de notre eau n'a pas suffi à la rendre riche en minéraux et que cette eau est une eau agressive (eau acide car le pH est inférieur à 7) puisqu'au plan microbiologique, les indicateurs chimiques de pollution y sont tous non détectables.

Sur la base de toutes ces données, nous pouvons dire que nous sommes en présence d'une eau de qualité acceptable.

Les fiches d'analyses physico-chimique et bactériologique du Laboratoire Central de la SONEB sont présentées respectivement en **annexes N°7** et **N°8**.

### **III-6-2. Sources possibles de contamination/pollution**

Bien que l'eau captée soit de qualité acceptable, il est nécessaire d'identifier les différentes sources possibles de contamination afin de prévoir des solutions pour éviter tout risque de contamination. Dans le cas d'une source souterraine salubre, les eaux de ruissellement s'infiltrent à travers les terres de couverture (généralement formées d'un mélange de sols, de sable, de limon ou d'argile), puis dans le substratum rocheux. Cette filtration naturelle peut prendre des années. Puisque des bactéries telles que E. coli survivent pendant des semaines ou des mois dans l'eau et six mois ou plus dans le sol, elles devraient, en principe, disparaître de l'eau qui s'écoule et mourir durant le processus de filtration naturelle. D'après des études sur la durée de vie de E. Coli dans divers types de sols, les résultats montrent que de manière générale, le temps de survie dans le compartiment sol est très variable : il se compte parfois en semaine, mais aussi en mois, et même quelquefois en année, par exemple dans le cas d'un sol gelé. Si la source souterraine est salubre, la contamination bactérienne des eaux de ruissellement n'exerce aucune influence directe sur la nappe souterraine. Cependant, l'efficacité du processus de filtration naturelle peut dépendre de plusieurs facteurs, dont une liaison assez directe entre les eaux de surface et la nappe aquifère. S'il existe un passage direct entre un aquifère et les eaux de surface, les bactéries vivantes peuvent pénétrer directement dans la source d'eau souterraine.

On peut craindre qu'une activité se déroulant hors ou sur les terres de couverture des aquifères de la zone d'étude (les décharges sauvages, latrines inadéquates, pesticides, rejets des usines) contribue à la pollution des eaux de la nappe (LALÈYÈ, 2014).



Cette pollution est d'autant plus élevée que ce sont des activités de baignade, de lessive et de vaisselle qui sont menées dans les eaux de surface environnantes.

La présence des zones topographiques basses (vallées telle que la grande vallée de l'Ouémé, dépressions) dans les environs de la commune de ZOGBODOMEY et la nature captive de l'aquifère favorisent la résurgence des eaux souterraines en plusieurs points car les eaux de surfaces sont des exutoires naturels des eaux souterraines. S'il existe un passage direct entre un puits ou un aquifère et les eaux de ruissellement, les bactéries vivantes peuvent pénétrer directement dans la source d'eau souterraine les substances toxiques naturelles et celles produites par les activités humaines et animales sur les sites polluent les eaux de surface. La communication avec des sources d'eau environnantes et la recharge naturelle sont donc des chemins de contamination de l'aquifère.

### **III-6-3. Approches de solutions**

La lutte contre la pollution des eaux est un enjeu majeur pour assurer l'accès à l'eau potable aux générations futures. C'est dans cette vision que sont proposées les solutions ci-dessous pour réduire les risques de pollution des eaux souterraines :

- sensibiliser la population sur le danger que représente la pollution des eaux occasionnée par leurs différentes habitudes au quotidien ;
- détruire tous les dépotoirs d'ordures installés dans la commune de ZOGBODOMEY et ses alentours ;
- doter les élus locaux de moyens efficaces afin de faire respecter les dispositions réglementaires dans le cadre de la protection des eaux superficielles ;
- développer l'agriculture biologique afin d'éviter à moyen et long terme l'usage des pesticides et des engrais chimiques et de diminuer ainsi la charge polluante des eaux ;
- minimiser la pollution des eaux de surfaces par les matières fécales, en encourageant la promotion et la vulgarisation des latrines écologiques ;
- procéder à la dépollution des eaux de surface pour permettre la prolifération des espèces animales aquatiques telles que les poissons, les crevettes ;
- développer les réseaux d'adduction d'eau potable dans tous les villages situés à proximité des eaux de surface de la zone.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche est une contribution à l'amélioration de l'état de connaissance des ressources en eaux souterraines de la région du département du ZOU. Les résultats des différentes analyses montrent que l'ETR est le paramètre qui influence le plus la recharge et à l'horizon du projet (2030), cette recharge est estimée à 296,27 mm à l'aide des données disponibles.

L'étude a révélé que la commune de ZOGBODOMEY regorge d'un potentiel très important en réserve d'eau souterraine. Cette réserve constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations. La notion de volume exploitable est une notion très difficile à définir car très subjective. Elle dépend des choix des gestionnaires de la ressource en eau disponible.

Les données piézométriques faisant véritablement défaut (piézomètres insuffisants sur l'étendue de la zone d'étude), nous n'avons pas pu réaliser un modèle numérique de l'aquifère. Cependant, le calcul du ratio prélèvement/recharge l'aquifère à l'horizon du projet (2030), nous permet de dire que cet aquifère serait sujet d'une surexploitation. Les imprécisions sur certaines données telles que le rayonnement rendent difficile une quantification exacte de la recharge. Les méthodes utilisées sont extrêmement simplistes pour caractériser un phénomène extrêmement complexe. D'où la nécessité de recourir à d'autres techniques complémentaires.

Ces résultats serviront d'appui à la DG-Eau pour le renforcement structurel des capacités de gestion quantitative et qualitative des ressources en eau. Vu l'augmentation de la demande en eau dû à l'accroissement de la population dans la région, la connaissance de la quantité d'eau disponible permettra d'élaborer des stratégies efficaces de gestion et aussi d'élaborer un plan de protection des ressources en eaux souterraines, plus particulièrement de celle de la commune de ZOGBODOMEY.

## RECOMMANDATIONS

En définitive, nous pouvons formuler quelques recommandations en vue d'améliorer l'étude réalisée:

- ✓ faire un levé topographique sur tout le bassin versant de la commune de ZOGBODOMEY, cela permettra de reconstituer la surface topographique du site, afin d'avoir un bon nivellement relatif à l'échelle du site.
- ✓ faire de nouveaux piézomètres à l'échelle du bassin de la commune de ZOGBODOMEY afin de disposer d'un réseau de suivi permanent de la nappe, d'établir une carte piézométrique plus correct et de reconstituer le bassin hydrogéologique de ZOGBODOMEY. Cela permettra aussi de mettre en place un site expérimental dans la zone afin d'y mener des études approfondies.
- ✓ sensibiliser et inciter les cultivateurs à effectuer des pratiques culturales qui ne favorisent pas le ruissellement sur les zones de recharge. Ces pratiques devront permettre de toujours assurer l'alimentation de la nappe et elles doivent minimiser les risques de pollutions de la nappe.
- ✓ prévoir d'autres sources d'eau pour renforcer le système d'alimentation en eau potable des populations à l'horizon du projet.

De plus, du point de vu de la qualité actuelle de l'eau, un traitement physique de dégazage et chimique de chaulage (traitement à la chaux) suivi d'une désinfection à l'hypochlorite de calcium suffisent pour rendre l'eau conforme à la consommation humaine. Le traitement à la chaux permettra la reminéralisation (surtout l'apport des ions calciums) de l'eau, son alcalinisation et également l'élévation de son pH. La désinfection à l'hypochlorite de calcium permettra la prévention d'une quelconque pollution fécale surtout en période pluvieuse.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **Ouvrages :**

**Anne-Paule ETRILLARD**, 1994. Etude de la recharge des nappes aquifères de BIDI au Burkina Faso.

**Houessou Aurélien, Lang Jacques**. Contribution à l'étude du «Continental terminal» dans le Bénin méridional. In: Sciences Géologiques. Bulletin, tome 31, n°4, 1978. Sédimentologie et géochimie de la surface.

**INSAE**, 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin. RGPH-4, 2013.

**INSAE**, 2016. Principaux indicateurs socio-démographiques et économiques. RGPH-4, 2013. pp.6.

**Jaunat, J.** (2012). Caractérisation des écoulements souterrains en milieu fissure par approche couplée hydrologie-géochimie-hydrodynamique. Thèse de doctorat, France: université Michel de Montaigne - bordeaux 3.

**Jonathan Edwards**, 2017. Construction de modèles stratigraphiques à partir de données éparses. Stratigraphie. Université de Lorraine.

**Jean Baptiste ACHIDI et al**, 2010. Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable. Guide méthodologique à l'usage des communes.

**Nestor René AHOYO ADJOVI**, 2006. Monographie de la commune de ZOGBODOMEY Programme d'appui au démarrage des communes.

### **Articles :**

**LALÈYÈ et al**, 2014. International Journal of Biological and Chemical Sciences. Relation eau de ruissellement et eau des sources et forages artésiens dans la région Zagnanado-Zogbodomey au Bénin : Approche couplée (pollution microbiologique – télédétection). URL : <http://ajol.info/index.php/ijbcs> .

**Roohul Khan, Saiful Islam, Ram Karan Singh**, Février 2016. International Journal of Engineering Associates (ISSN: 2320-0804) # 6 / Volume 5 Issue 2. Methods of estimating groundwater Recharge, URL: <https://www.researchgate.net/publication/303435940>

**Cours et mémoires de 2iE :**

**A. Keïta**, 2009-2018. Irrigation par aspersion. Pp.25-26 &29.

**Harouna KARAMBIRI**, 2008. Hydrologie des bassins versants. Pp.54.

**Sites web:**

ASECNA. Climatologie\_Statistiques sur la climatologie – Benin Data Portal. URL : <http://benin.opendataforafrica.org/kbekwme/climatologie-statistiques-sur-la-climatologie> .  
Dernier accès le 28 novembre 2019.

Climatologie de l'année 2015 à Bohicon. URL : <http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2015/bohicon/valeurs/65338.html> . Dernier accès le 30 novembre 2019.

Crétacé, période géologique, 2019. URL : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A9tac%C3%A9> . Dernier accès le 13 novembre 2019.

ONU, 2010. <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/water/index.html> . Dernier accès le 13 novembre 2019.

Weather Spark. URL : <https://fr.weatherspark.com/m/47061/12/M%C3%A9t%C3%A9o-habituelle-en-d%C3%A9cembre-%C3%A0-Bohicon-B%C3%A9nin#Sections-SolarEnergy> .  
Dernier accès le 02 novembre 2019.



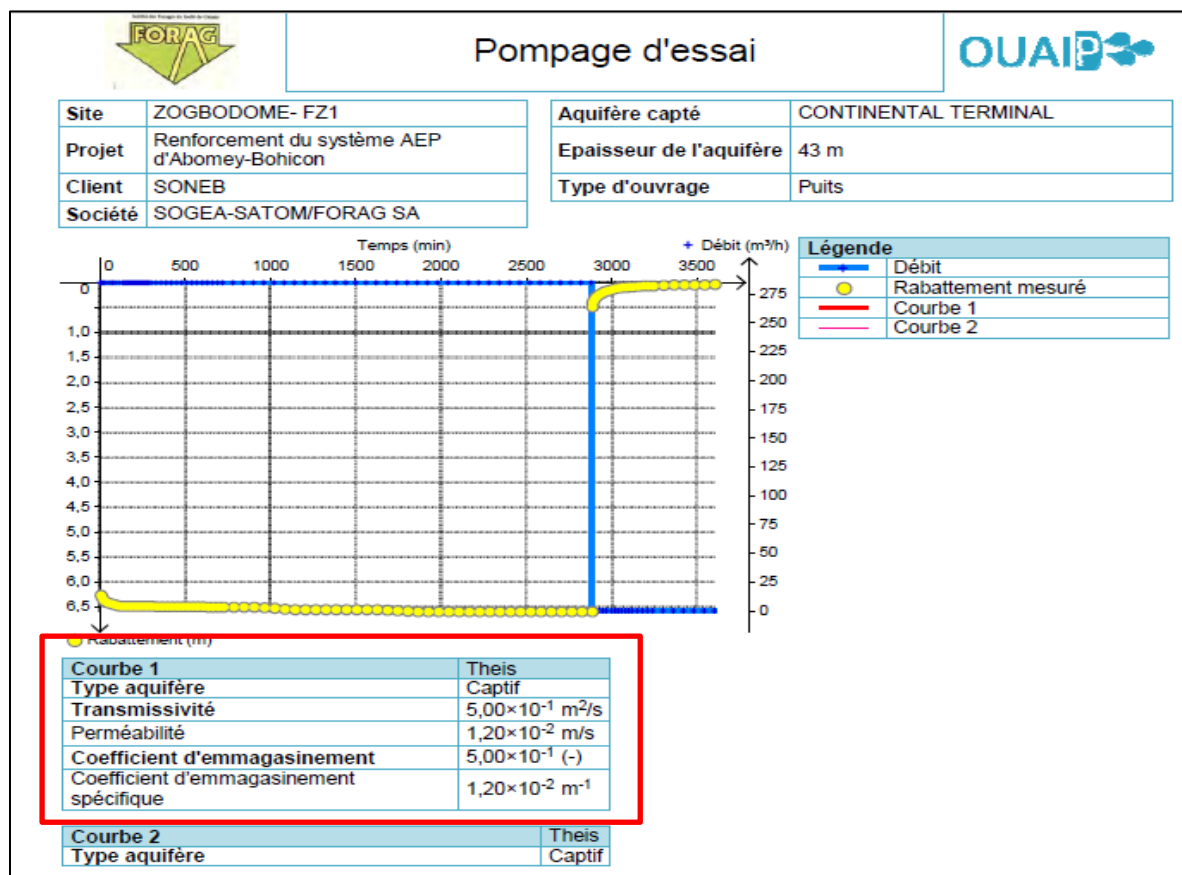
**IV. ANNEXES**

**Annexe N°1: Données pluviométriques et climatologiques de la station synoptique de Bohicon.**

Mois	Précipitations (mm)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	0	0	0,2	23,4	3,8	0
Février	192	47,1	15,8	27,5	17,9	12,2
Mars	20,8	16,4	77,7	130,1	116,7	188,9
Avril	115,9	197	112,4	68,8	26	186,7
Mai	108,3	140,4	133,9	173,7	88,2	119,5
Juin	127,9	177,6	94	148,8	63	266
Juillet	209,3	130,7	126	88,4	104,9	122,2
Août	117,8	54,9	34,8	129,4	70,8	64
Septembre	187,8	164,9	60,2	245,2	34,2	258,5
Octobre	172,1	197,1	73	102,9	174,5	147,2
Novembre	14,4	35,8	66,4	22,9	9,6	2,8
Décembre	0	39,7	13,4	0	0	38,8

Mois	Températures mensuelles moyennes (°C)						Rayonnements moyen (Kwh/m2/jour)
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Janvier	28,8	29,1	29,8	30,4	28,7	29,9	5
Février	29,4	29,9	30,8	30,5	30,7	31,4	4,9
Mars	30	30,5	30,7	29,8	30,5	30,7	4,5
Avril	29,8	29,3	29,7	29,3	30	29,6	4,5
Mai	28,6	28,4	28,3	28,7	29,5	28,7	4,4
Juin	27,7	27	27,1	27,7	27,6	27,1	4,5
Juillet	26,4	26,1	26,3	26,6	26,9	26,7	4,7
Août	25,9	25,4	25,7	25,7	26,6	26,4	4,9
Septembre	27,1	26,8	26,8	26,6	27,1	27,3	4,8
Octobre	27,4	27,6	27,6	27,7	28,1	28,1	4,7
Novembre	29,2	29,2	28,9	28,6	29,1	29,9	4,9
Décembre	29	29,3	29	29,4	28,7	29,8	5,1

**Annexe N°2: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de la commune de ZOGBODOMEY fournies pour les huit nouveaux forages.**



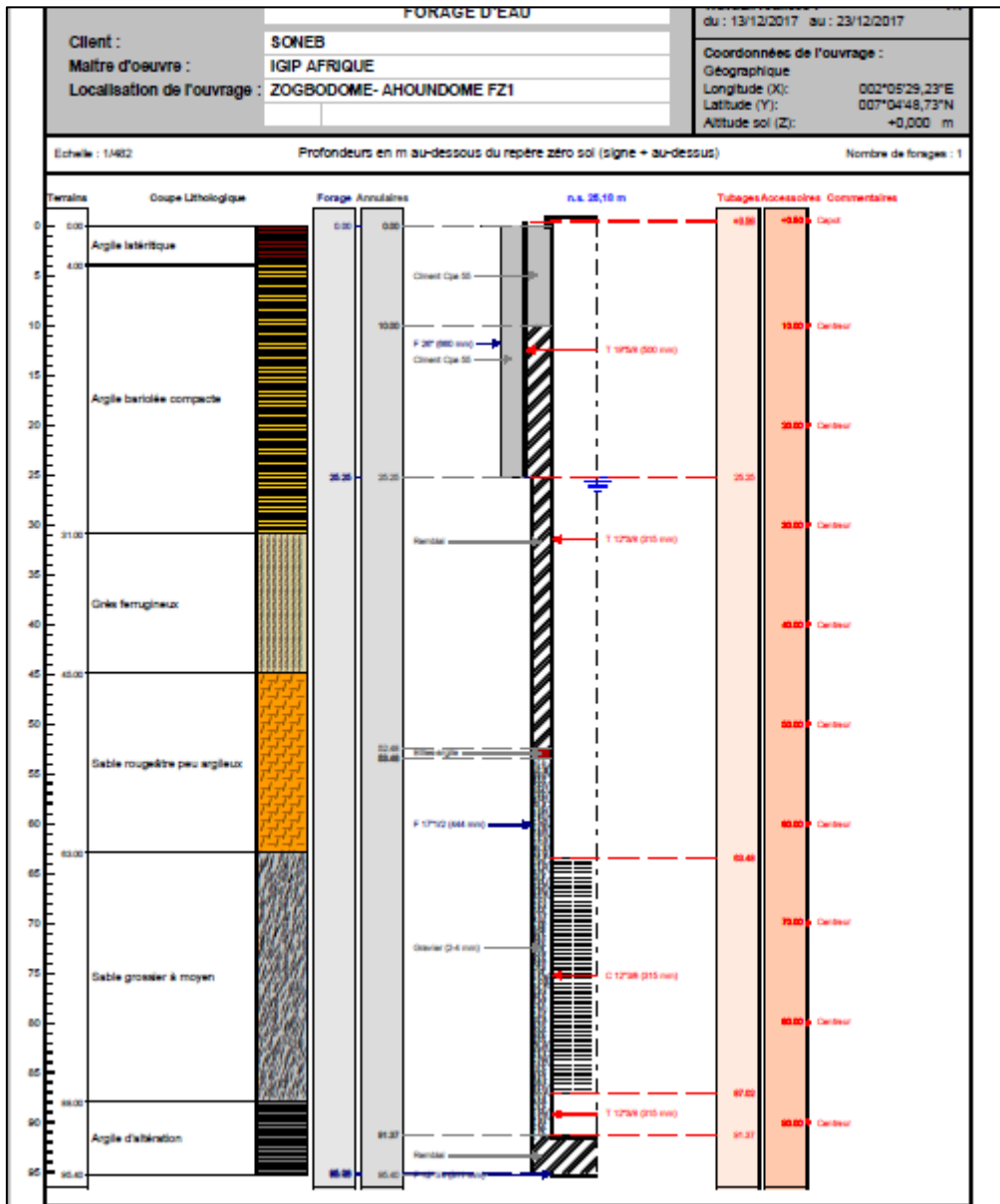
**Annexe N°3 : Les valeurs de la RFU.**

Mois	Pluie efficace (mm)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janvier	108,70	108,25	107,43	129,78	112,65	107,09
Février	235,00	165,90	133,45	145,53	135,68	129,12
Mars	139,22	134,18	195,22	235,00	234,48	235,00
Avril	234,58	235,00	231,21	188,14	144,42	235,00
Mai	230,85	235,00	235,00	235,00	209,55	235,00
Juin	235,00	235,00	216,43	235,00	184,70	235,00
Juillet	235,00	235,00	235,00	207,18	223,21	235,00
Août	233,34	171,30	150,68	235,00	185,18	178,71
Septembre	235,00	235,00	176,46	235,00	149,99	235,00
Octobre	235,00	235,00	190,24	219,99	235,00	235,00
Novembre	124,78	146,18	177,21	134,16	120,12	112,18
Décembre	106,13	145,38	119,53	105,53	106,59	143,74



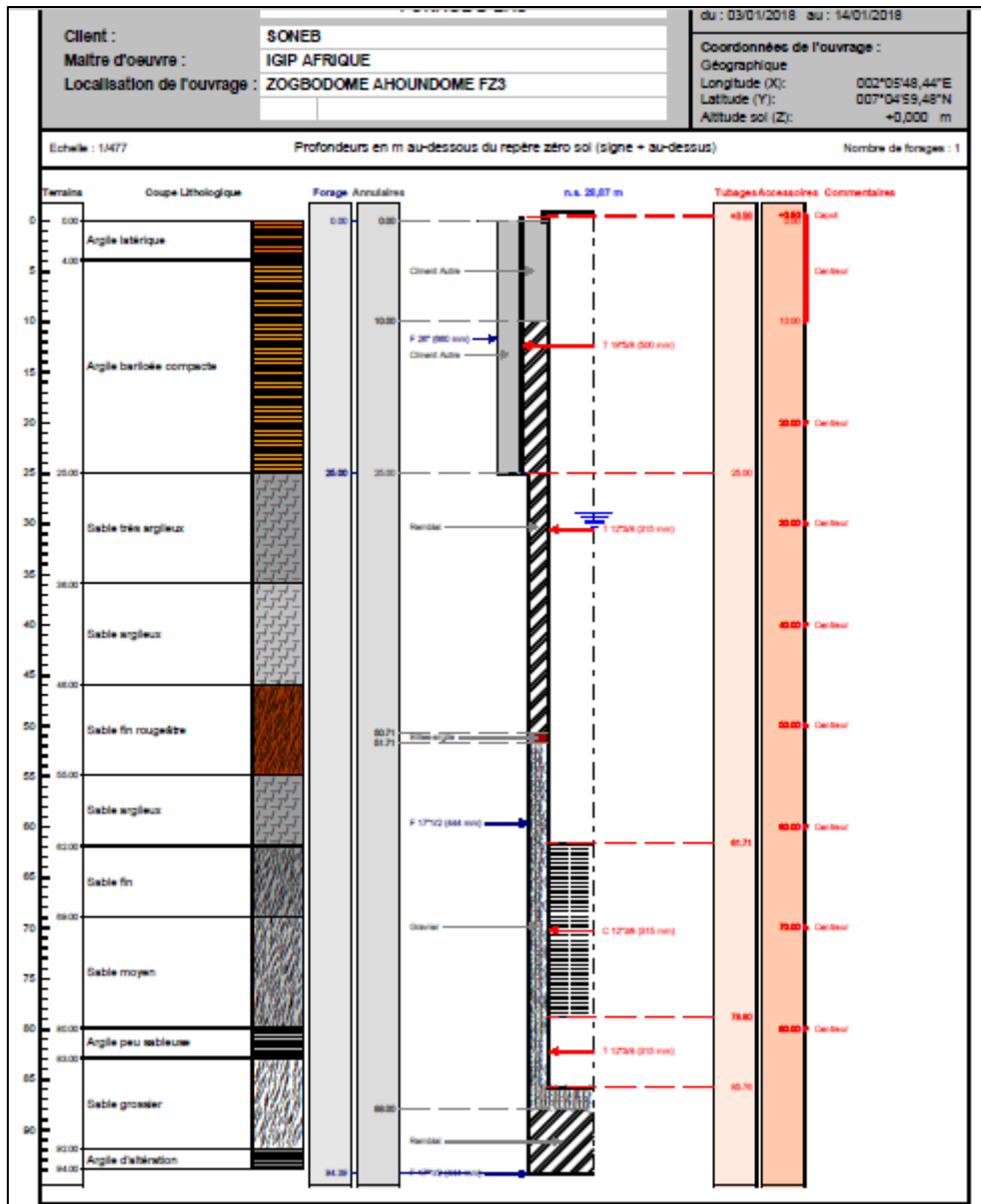
**Annexe N°4: Logs stratigraphiques des nouveaux forages**

Les figures ci-dessous représentent les logs stratigraphiques fournis dans le dossier technique des forages :

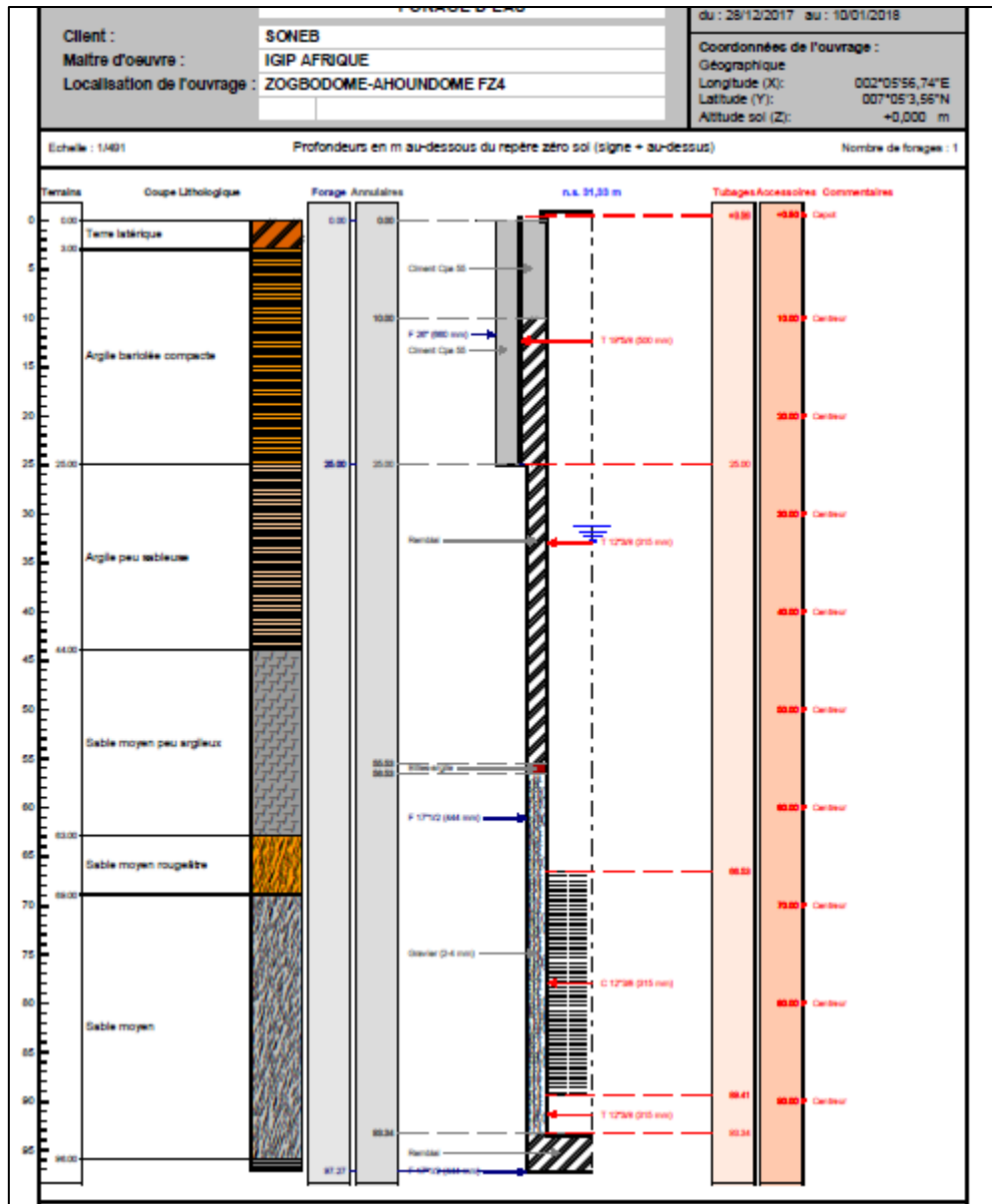




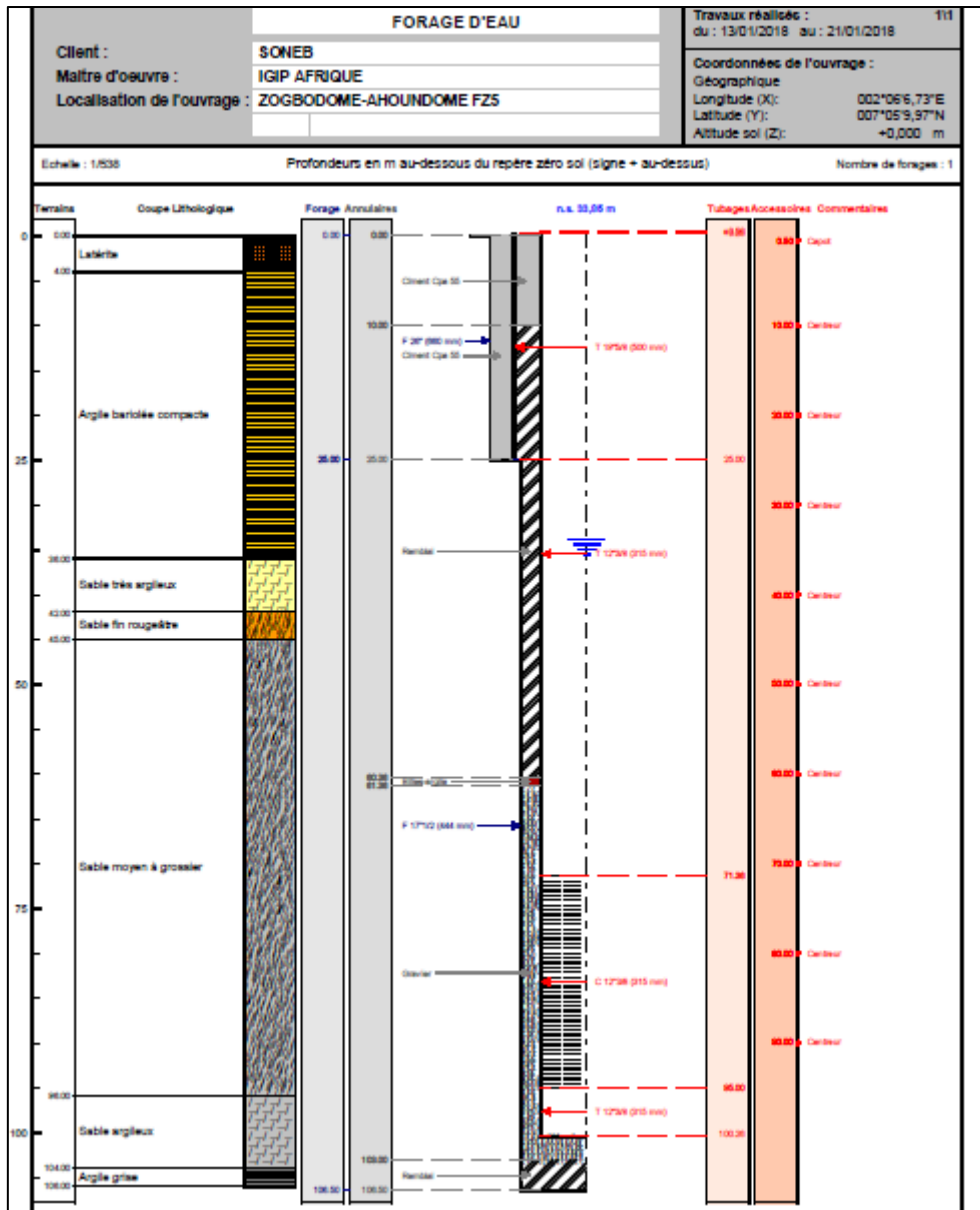
EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA COMMUNE DE ZOGBODOMEY.



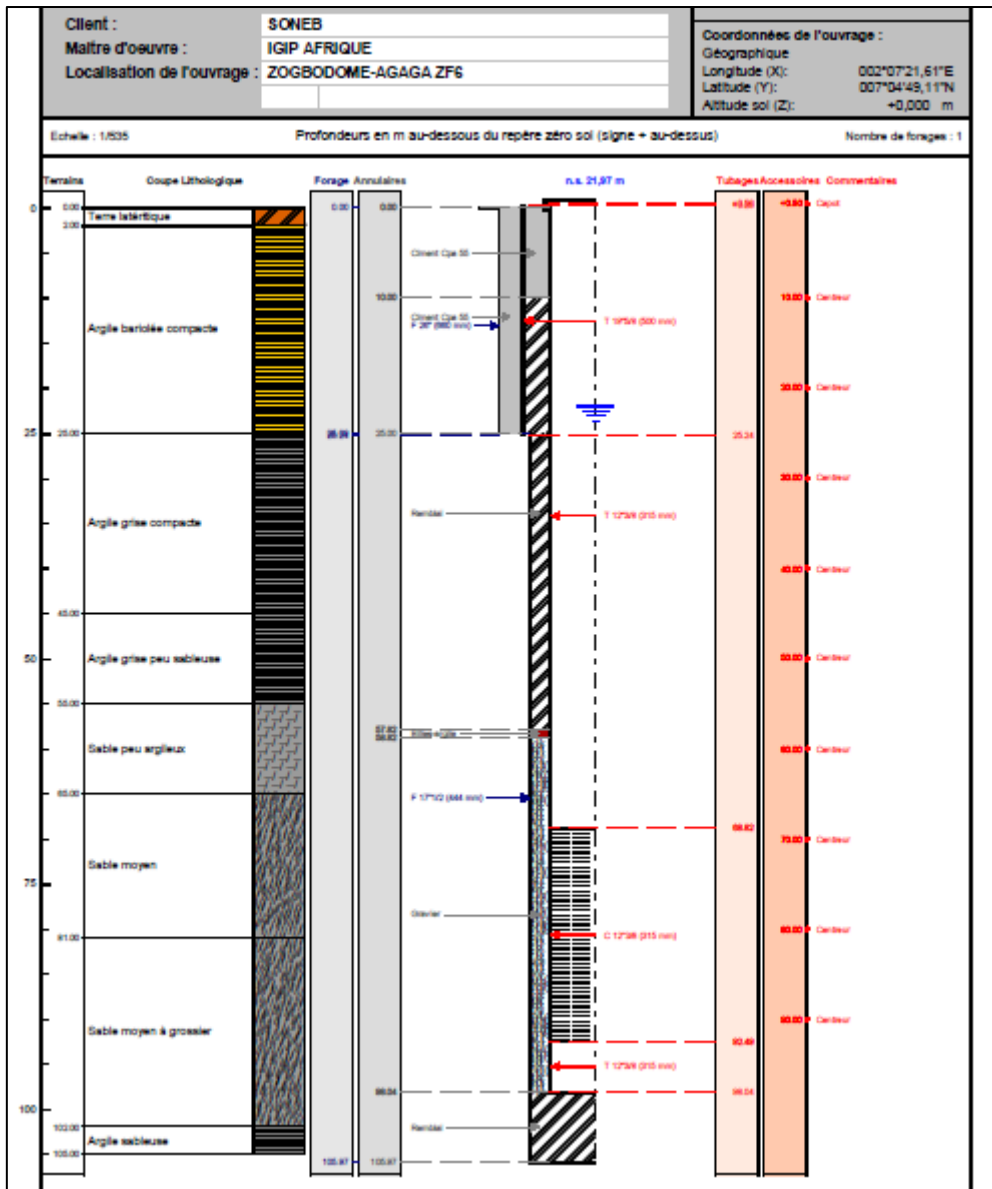
EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA COMMUNE DE ZOGBODOMEY.



EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA COMMUNE DE ZOGBODOMEY.



EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA COMMUNE DE ZOGBODOMEY.



**Annexe N°5: Indices de sensibilité.**

Mois	Recharge (mm)	Pluviométrie (mm)	Température (°C)	ETR (mm)	Vitesse d'infiltration (mm/s)	Sp	St	Setr	Svi
févr. 2011	61,17	192,00	29,40	115,5	1,42E-04	-	-	-	-
juin-11	11,56	127,90	27,70	113,4	1,00E-05	2,43	14,02	44,63	0,87
juil. 2011	74,72	209,30	26,40	115,9	8,60E-05	8,58	-116,35	251,78	0,72
sept. 2011	54,87	187,80	27,10	119,2	4,90E-05	2,59	-10,02	-9,30	0,62
oct. 2011	43,71	172,10	27,40	117,4	3,60E-05	2,43	-18,36	13,79	0,77
avr. 2012	65,07	197,00	29,30	115,6	7,50E-05	3,38	7,05	-31,97	0,45
mai-12	22,57	140,40	28,40	112,1	2,00E-05	2,27	21,26	21,71	0,89
juin-12	52,14	177,60	27,00	112,4	5,00E-05	4,94	-26,57	618,83	0,87
juil. 2012	12,22	130,70	26,10	115,4	1,20E-05	2,90	22,97	-28,66	1,01
sept. 2012	36,93	164,90	26,80	118,7	3,30E-05	7,73	75,38	70,34	1,16
oct. 2012	63,47	197,10	27,60	117,7	4,90E-05	3,68	24,08	-86,94	1,48
mai-13	17,48	133,90	28,30	112,0	1,60E-05	2,26	-28,57	14,93	1,08
juil. 2013	8,20	126,00	26,30	115,7	9,00E-06	9,00	7,51	-16,08	1,21
mars-14	11,02	130,10	29,80	116,3	1,30E-05	10,55	2,58	68,68	0,77
mai-14	48,89	173,70	28,70	112,5	5,10E-05	10,25	-93,08	-107,03	1,18
juin-14	28,28	148,80	27,70	113,4	3,30E-05	2,94	12,10	-55,53	1,19
août 2014	8,23	129,40	25,70	119,1	1,10E-05	5,44	9,82	-14,18	1,06
sept. 2014	101,42	245,20	26,60	118,4	9,80E-05	12,66	323,55	-1937,60	1,43
oct. 2015	44,80	174,50	28,10	118,5	4,00E-05	1,94	-9,90	-824,19	0,94

EVALUATION DE LA RECHARGE NATURELLE D'UN AQUIFERE DANS LA COMMUNE DE ZOGBODOMEY.

mars-16	57,14	188,90	30,70	117,4	1,32E-04	3,34	2,98	-31,84	0,12
avr. 2016	56,51	186,70	29,60	116,0	9,30E-05	0,94	0,31	0,91	0,04
mai-16	5,53	119,50	28,70	112,5	5,00E-06	2,51	29,67	30,16	0,95
juin-16	122,75	266,00	27,10	112,5	1,09E-04	17,29	-380,32	- 113968,42	1,02
juil. 2016	4,66	122,20	26,70	116,3	4,00E-06	1,78	65,18	-28,43	1,00
sept. 2016	111,18	258,50	27,30	119,5	6,80E-05	20,50	1017,75	845,34	1,43
oct. 2016	22,96	147,20	28,10	118,5	2,40E-05	1,84	-27,08	92,54	1,23

**Annexe N°6: Evaluation des besoins en eau de la population-cible du projet de renforcement du système d'AEP des villes d'Abomey, Bohicon et environs (pour l'année 2030).**

	Bohicon	Abomey	Total
Branchement privé (m <sup>3</sup> /s)	3,26	1,75	5,01
Besoins en eau domestiques (m <sup>3</sup> /s)	0,14	0,07	0,21
Besoins en eau des services publics (m <sup>3</sup> /s)	0,05	0,029	0,079
Besoin moyen journalier (m <sup>3</sup> /j)	7,02		–
Coefficient de pointe journalier	1,15		–
Coefficient de pointe horaire	1,58		–
Coefficient de perte	20%		–
Ht	0,95		–
Hr	0,85		–
Temps de fonctionnement	24h		–



**Annexe N°7: Fiche d'analyses physico-chimiques du laboratoire central d'analyses d'eau.**

FICHE D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE											
Paramètres	Unité	Directives de l'OMS	Normes Béninoises	Références des prélèvements et résultats							
				FZ1 Longue durée	FZ2 Longue durée	FZ3 Longue durée	FZ4 Longue durée	FZ5 Longue durée	FZ6 Longue durée	FZ7 Longue durée	FZ8 Longue durée
Turbidité	NTU	5	5	1,24	0,797	1,66	1,73	0,985	1,02	1,08	1,01
Température	°C	–	–	30,5	29,2	28,8	27,4	27,1	27,5	30,1	28,6
Potential Hydrogène (pH)	–	–	6,5<pH<8,5	5,57	5,53	5,82	5,91	5,36	5,43	6,6	5,33
Potential Hydrogène à l'équilibre carbonique (pHc)	–	–	–	6,73	7,19	7,17	7,01	7,58	7,4	7,11	6,81
Conductivité électrique	µS/cm	–	–	40,4	43,5	37,3	40	37,6	39,4	40,3	43,5
Alcalinité complète T.A.C	°F	–	–	1	1,2	1,2	1	1,6	1	1	1
Chlorure Cl-	mg/L	900	250	8,52	9,23	8,52	8,52	7,1	8,52	7,81	8,52
Sulfate SO4 2-	mg/L	250	500	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Calcium Ca2+	mg/L	100	100	1,43	2,85	2,85	2,14	1,42	2,14	2,14	2,14

FICHE D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

Paramètres	Unité	Directives de l'OMS	Normes Béninoises	Références des prélèvements et résultats							
				FZ1 Longue durée	FZ2 Longue durée	FZ3 Longue durée	FZ4 Longue durée	FZ5 Longue durée	FZ6 Longue durée	FZ7 Longue durée	FZ8 Longue durée
Magnésium Mg <sup>2+</sup>	mg/L	–	50	0,43	0,86	0,86	1,3	1,73	0,86	0,87	1,3
Carbonates CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	–	–	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces
Bicarbonates HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	–	–	12,2	14,64	14,64	12,2	14,64	12,2	12,2	12,2
Dureté totale TH	mg/L	–	200	1,86	3,71	3,71	3,44	3,15	3	3,01	3,44
Oxygène dissous	mg/L	–	–	3,8	4,7	4,2	3,4	4,6	4,3	4,3	4,4
Gaz carbonique libre	mg/L	–	–	80,96	84,48	72,16	80,96	86,24	84,48	105,6	80,96
Gaz carbonique agressif	mg/L	–	–	43,12	75,68	40,48	55,44	65,12	60,72	74,8	53,68
Equilibre CaCO <sub>3</sub>	–	–	–	Agressif	Agressif	Agressif	Agressif	Agressif	Agressif	Agressif	Agressif
Nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	50	45	2	5	4	5	5	4	4	6
Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	3	3,2	< 0,046	< 0,046	< 0,046	< 0,046	< 0,046	< 0,046	< 0,046	< 0,046
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	1,5	–	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Oxydabilité au KMnO <sub>4</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	5	5	2,37	2,29	1,48	2,29	3,48	1,85	0,81	2,59
Fer total Fe 2+/3+	mg/L	0,3	0,3	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05

FICHE D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

Paramètres	Unité	Directives de l'OMS	Normes Béninoises	Références des prélèvements et résultats							
				FZ1 Longue durée	FZ2 Longue durée	FZ3 Longue durée	FZ4 Longue durée	FZ5 Longue durée	FZ6 Longue durée	FZ7 Longue durée	FZ8 Longue durée
Manganèse total Mn <sup>2+/4+</sup>	mg/L	0,5	0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Orthophosphates PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg P/L	–	0,8	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005

**Annexe N°8: Fiche d'analyses bactériologiques du laboratoire central d'analyses d'eau.**

FICHE D'ANALYSE BACTERIOLOGIQUE									
Lieu de prélèvement de l'échantillon	Paramètres opérationnels mesurés sur site				Paramètres bactériologiques				
ZOGBODOMEY	pH	Température (°C)	Conductivité (µS/cm)	Turbidité (NTU)	Germes banals en 48h (UFC /ml)	Recherche présumptive des CT (+/- )	E.Coli (UFC /100 ml)	Entérocoques fécaux (UFC /100 ml)	Clostridium sulfito-réducteur (UFC /20 ml)
FZ1	5,57	30,5	40,4	1,24	2	Négative	0	0	0
FZ2	5,53	29,2	43,5	0,797	1	Négative	0	0	0
FZ3	5,82	28,8	37,3	1,66	4	Négative	0	0	0
FZ4	5,91	27,4	40	1,73	2	Négative	0	0	0
FZ5	5,36	27,1	37,6	0,385	2	Négative	0	0	0
FZ6	5,43	27,5	39,4	1,02	3	Négative	0	0	0
FZ7	6,6	30,1	40,3	1,08	0	Négative	0	0	0
FZ8	5,33	28,6	43,5	1,01	3	Négative	0	0	0
Normes Béninoises	6,5<pH<8,5	–	–	5	50	Négative	0	0	0
Directives de l'OMS	–	–	–	5	–	–	0	0	0