



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

\*\*\*\*\*

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

\*\*\*\*\*



DEPARTEMENT DE L'EAU POUR L'AGRICULTURE ET LA SOCIETE

\*\*\*\*\*

OPTION : GENIE RURAL ET MAITRISE DE L'EAU (GRME)

MEMOIRE DE FIN DE FORMATION POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER

THEME

ETUDE DE L'ALTERATION DU SIGNAL PIEZOMETRIQUE ANNUEL DE RECHARGE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR AU NIVEAU DE L'AQUIFERE DU MIO-PLIOCENE DU PLATEAU D'ALLADA DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Réalisée par :

**HOUNSOU-GANYE Sègnon Martiale Maurelle**

Sous la direction de :

Co-Superviseur :

**Dr. Ir AHOUANSON M. Maurice**

Enseignant-Chercheur à la FSA/UAC  
Maître Assistant du CAMES

Superviseur :

**Dr. Ir YALO Nicaise**

Enseignant-Chercheur à l'INE/UAC  
Professeur Titulaire du CAMES

Maître de stage

**Dr. LAWSON Fabrice**

Enseignant-Chercheur à l'INE

**6<sup>ème</sup> Promotion**

Année académique : 2020-2021

## **CERTIFICATION**

Nous soussignés **Professeur YALO Nicaise**, Enseignant chercheur à l’Institut National de l’Eau (INE) de l’Université d’Abomey-Calavi (UAC) et **Dr. Ir AHOUANSOU M. Maurice**, Enseignant Chercheur à la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l’Université d’Abomey-Calavi (UAC), certifions que ce travail a été entièrement conduit et réalisé sous notre supervision par l’étudiante **HOUNSOU-GANYE S. M. Maurelle** de l’Institut National de l’Eau (INE) de l’Université d’Abomey-Calavi (UAC), pour l’obtention du diplôme de Master Professionnel en Génie Rural et Maîtrise de l’Eau (GRME).

### **Le Superviseur**

**Professeur YALO Nicaise**

Enseignant-Chercheur à l’INE/UAC

### **Le Co-Superviseur**

**Dr. Ir AHOUANSOU M. Maurice**

Enseignant-Chercheur à la FSA/UAC

## **DÉDICACE**

Je dédie ce travail à mes parents :

✓ **HOUNSOU B. Mathieu**

✓ **KOUKPO V. Francisca**

Qui nous ont donné la vie. Merci pour les conseils que vous ne cessez de nous prodiguer et la patience dont vous avez toujours fait preuve jusqu'à ce jour et vos soutiens sans faille ; nous serons toujours reconnaissantes envers vous.

## REMERCIEMENTS

Au terme de cette recherche, en premier lieu, je remercie le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui par son immense bonté et sa grâce, nous a permis d'être à bout de cette formation.

- Mes vifs remerciements et profonde reconnaissance au Docteur Dr. LAWSON Fabrice, Enseignant à l'INE qui a accepté d'être mon maître de stage. Il m'a donné des directives, des conseils et a sacrifié de son temps en m'encadrant pour la rédaction de ce mémoire malgré ses multiples occupations. Qu'il reçoive ainsi ma profonde gratitude et mes sincères remerciements.
- Mon Superviseur Professeur YALO Nicaise, Enseignant-Chercheur à l'INE/UAC pour son encadrement, sa disponibilité et son orientation.
- Mon Co- superviseur Dr. AHOUANSON M. Maurice, Enseignant-Chercheur à la FSA qui malgré ses multiples et importantes occupations, a accepté de suivre de bout en bout et diriger ce travail avec patience et abnégation.
- Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), au Professeur Luc O. SINTONDJI, Enseignant Chercheur et Directeur Adjoint à l'INE, Dr. Mathieu B. HOUNSON, Enseignant Chercheur et Chef Département Eau pour l'Agriculture et pour la Société (DEAS), pour l'intérêt qu'ils ont accordé à l'organisation de notre formation.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche du Laboratoire Mixte International (LMI) en partenariat avec l'IRD. Nous souhaitons remercier tous les acteurs intervenant dans ce projet en particulier Dr. Jean-Michel VOUILLAMOZ chargé de recherche à l'IRD, Dr. Christian ALLE Enseignant Chercheur au DHGRE/INE et Mme LANWIN Rolande secrétaire de LMI-REZOC.

- Tous les enseignants et tout le personnel de l'INE spécialement ceux du Département de l'Eau pour l'Agriculture et la Société (DEAS), pour tous vos conseils et la formation que vous nous avez donnés. Nous vous remercions et que le miséricordieux vous accompagne dans toutes vos actions ;
- Aux membres du Jury pour avoir accepté malgré leurs multiples occupations d'apprécier ce travail.

Mes remerciements vont à l'endroit de toutes les personnes qui m'ont aidé pour la réalisation de ce travail malgré leurs multiples occupations, particulièrement aux Messieurs LAWSON James, ABALLO Christian, TOHOUN G. Emmanuel ; Que Dieu le tout puissant vous bénisse.

Un grand merci à nos camarades étudiants de la 6<sup>ème</sup> promotion en particulier HOUNGAN Geoffroy, TALON Pamela, MAGNON Lynda, AGOSSOU Gédéon et TONON Johannot pour tous les inoubliables moments de labeur, de gaieté et d'amitié passés durant le cycle.

- Tous nos amis qui de près ou de loin n'ont jamais cessé de nous soutenir en particulier ALLAGBE Grâce, BIAOU Gildas, AHOUANGNIVO Judith, TONASSE Elitesse, DAVI Vanessa et Stéphanie.

Nous exprimons également toute notre reconnaissance à nos frères et sœurs Bérence, Flamel, Marlette, Marlis et AGNIDE Brunel, à notre enfant EVELIA Maël, pour la patience, l'affection, le soutien, les encouragements et les sacrifices consentis à notre égard ; que ce travail soit pour vous un exemple à suivre.

Nous remercions toute notre famille paternelle (HOUNSOU GANYE et HOUNDEFODO) et maternelle (KOUKPO et HOUSSOU) ainsi que tous nos proches, pour le soutien et l'encouragement qu'ils nous ont toujours apportés et tous ceux dont nous avons omis les noms et qui pourtant nous ont assistés tout au long de notre formation, ceux qui ont aussi lu et corrigé ce mémoire.

## LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

<b>BSC</b> : Bassin Sédimentaire Côtier
<b>DEAS</b> : Département de l'Eau pour l'Agriculture et la Société
<b>ENE</b> : Est Nord Est
<b>ESRI</b> : Environmental Systems Research Institut
<b>FEFLOW</b> : Finite Elements Subsurface Flow system
<b>GPS</b> : Global Positioning System
<b>GRME</b> : Génie Rural et Maîtrise de l'Eau
<b>INE</b> : Institut National de l'Eau
<b>IRD</b> : Institut de Recherche et de Développement
<b>INSAE</b> : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
<b>LMI</b> : Laboratoire Mixte International
<b>NNE</b> : Nord Nord Est
<b>OMD</b> : Objectif du Millénaire
<b>ONU</b> : Organisation des Nations Unies
<b>UAC</b> : Université d'Abomey-Calavi
<b>RGPH</b> : Recensement Général de la Population et de l'Habitat
<b>SIG</b> : Système d'Information Géographique
<b>SSW</b> : Sud Sud Ouest
<b>WSW</b> : Ouest Sud-Ouest
<b>ZNS</b> : Zone Non Saturée
<b>Slice</b> : Tranche, coupe, toit de la nappe
<b>3D</b> : trois dimensions : x, y, z
<b>2D</b> : Deux dimensions : x, y
<b>m<sub>e</sub></b> : Porosité
<b>K</b> : Conductivité hydraulique

## SOMMAIRE

CERTIFICATION.....	ii
REMERCIEMENTS .....	iv
LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS.....	vi
SOMMAIRE .....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ANNEXES.....	viii
RESUME.....	ix
ABSTRACT .....	x
INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE .....	4
Chapitre 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	13
Chapitre 3 : APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	19
Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	29
ANNEXES .....	45
TABLE DES MATIERES .....	53

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Schéma du cycle de l'eau.....	5
Figure 2 : Les deux types de nappe .....	7
Figure 3 : Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin. ....	12
Figure 4 : Situation géographique du plateau d'Allada.....	15
Figure 5 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie du plateau d'Allada .....	17
Figure 6 : Interface du logiciel Feflow .....	21
Figure 7 : portion de la zone d'étude.....	22
Figure 8 : maillage de la zone .....	23
Figure 9 : Fixation et représentation en 3D des slices.....	24
Figure 10 : Points d'observation .....	27
Figure 11 : section en 2D .....	28
Figure 12 : Importation de la recharge dans le logiciel.....	31
Figure 13 : Chronique de recharge utilisée .....	31
Figure 14 : Evolution de la charge hydraulique en fonction de la profondeur sur 10 ans .....	32
Figure 15 : zoom sur les slices 7 à 12 .....	33
Figure 16 : Elévations de la nappe .....	34

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Elevation des slices .....	25
Tableau 2 : Estimation de la recharge .....	30

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Paramètres hydrodynamiques de quelques sols selon RETC .....	46
Annexe 2 : Chronique de recharge sur 10ans.....	47
Annexe 3 : Chronique de recharge sur 20ans.....	48
Annexe 4 : Chronique de recharge sur 30ans.....	50

## RESUME

Situé dans le département de l'Atlantique entre 6°21 et 6°50 de latitude Nord, et entre 2° et 2°20 de longitude Est, le plateau d'Allada est l'un des plateaux du bassin sédimentaire côtier au Sud de la dépression de la Lama avec une superficie de 2140 km<sup>2</sup>, soit plus de 66% de la superficie totale du département de l'Atlantique. L'objectif du présent travail est l'analyse des signaux piézométriques en fonction de la profondeur suivant une échelle annuelle au niveau de l'aquifère du Mio-Pliocène. Pour mener cette étude, nous avons utilisé le logiciel FEFLOW qui nous a permis de simuler les signaux piézométriques. Cette étude a été menée sur douze (12) couches de l'aquifère. Les paramètres suivants : la conductivité hydraulique, les paramètres de Van genuchten et la porosité ont été calés lors de cette modélisation. La simulation a été effectuée sur huit (8) slices suivant une période de 10 ans avec une recharge annuelle de 0,00498713 mm et une charge hydraulique de 24.4924 m selon les réalités du terrain. Les résultats issus des simulations nous ont permis de savoir que plus nous allons vers le point le plus bas, moins la charge hydraulique diminue, et que la recharge et le temps de recharge n'agissent pas sur le signal piézométrique. Ce qui nous amène à dire que plus la profondeur du niveau statique augmente moins la charge hydraulique augmente suite à la recharge ; Nous pouvons donc dire que le signal piézométrique est fonction de la recharge qui elle-même dépend de la profondeur du toit de la nappe.

**Mots clés :** Slice, charge hydraulique, signal piézométrique, FEFLOW

## **ABSTRACT**

Located in the Atlantic department between 6°21 and 6°50 North latitude, and between 2° and 2°20 east longitude, the Allada plateau is one of the plateaus of the coastal sedimentary basin located at the South of the Lama depression with an area of, 2140 km<sup>2</sup>, that is to say more than 66% of the total surface of the department of the Atlantic. The objective of this present work is the analysis of the piezometric signals as a function of the depth according to an annual scale at the level of the Mio-Pliocene aquifer. To carry out this study, we used the FEFLOW software which gave us. Allowed to simulate the piezometric signals. This study was conducted on twelve (12) layers of the aquifer. The following parameters were calibrated during this modelling, namely the hydraulic conductivity, the Van Genuchten parameters and the porosity. The simulation was carried out on eight slices following a period of 10 years with an annual recharge of 0.00498713 mm and hydraulic head of 24.4924 m according to the realities of the ground. The results from the simulations allowed us to know that the further we go towards the lowest point, the less the hydraulic head decreases, and that the recharge time do not act on the piezometric signal. Which leads us to say that the more the depth of the static level increases, the less the hydraulic head increases following the recharge; we can therefore say that the piezometric signal is a function of the recharge which itself depends on the depth of the top of the aquifer.

**Keywords:** slice, hydraulic head, piezometric signal, FEFLOW

## INTRODUCTION

Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau est l'un des objectifs du Développement Durable (ODD), (ONU 2000), ce qui constitue un challenge pour l'Afrique sub-saharienne dont la population est passée de 33 millions en 1950 à 197 millions en 1990, puis 567 millions en 2015 et déjà à 1,15 milliard en 2022. Cette population devrait atteindre 2,09 milliards en 2050 (Agence Ecofin, Juillet 2022). Selon la base de données d'AFRICAPOLIS et le rapport ONU-habitat (2014), l'Afrique de l'Ouest demeure l'une des régions les moins urbanisées et est l'une des régions où la croissance urbaine est la plus rapide au monde. Marguerat (1992) a souligné qu'au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, l'Afrique noire aura connu une mutation d'une extraordinaire ampleur : le passage d'une société essentiellement rurale à une société majoritairement urbaine.

Par ailleurs, depuis des décennies, l'Afrique de l'ouest est l'une des régions la plus frappée par les événements climatiques surtout la sécheresse et l'inondation. De ce fait, le secteur de l'eau est plus vulnérable face à la variabilité climatique ; les cours d'eau voire les puits ou forages ont connu une baisse progressive de niveau ; certains s'étant même asséchés (Fink, 2007). Les pays Sahéliens continuent de subir sévèrement les effets de la sécheresse où l'accès à l'eau potable est difficile (Sircoulon, 1974).

En effet, les changements climatiques sont susceptibles de dégrader la disponibilité des ressources en eau sur une longue période (GIEC, 2014). Il est donc difficile de répondre normalement à la demande en eau dans certains pays de l'Afrique à cause de l'évolution des paramètres climatiques et de la croissance démographique de même que l'augmentation de la température (Gato *et al.*, 2007). A cet effet, les pays comme le Bénin ne sont pas épargnés de la situation climatique actuelle. Les études réalisées ont prouvé qu'au sud du pays la seconde saison pluvieuse est marquée par un déficit pluviométrique, hormis la zone côtière dont la variation est à la hausse (Zinsou, 2013). Alors l'étude de la variabilité climatique est utile au regard des perturbations climatiques actuelles. Toutefois, les changements climatiques induisent des changements cruciaux pour la ressource en eau (Mouhouyouddine Ali Houmadi, 2015) : ils peuvent affecter différents secteurs. Ainsi dans le domaine de la ressource en eau, différents scénarii ont permis d'établir l'évolution du volume annuel d'eau écoulé aux horizons futurs sur la base des projections climatiques issues des modèles couplés de circulation générale. La plupart des scénarii prévoient une diminution des précipitations qui varie de 0,5 à 40% avec une moyenne de 15% pour l'horizons 2025 (Totin *et al.*, 2015). Beaucoup de ces scénarii font état d'une baisse accentuée des écoulements et de la recharge des nappes souterraines (Niasse *et al.*, 2004 ; Döll, 2009 ; Dennis *et al* 2012), d'autres cependant prévoient

une augmentation des précipitations dans la région du sahel (Maynard *et al.*, 2002, Haarsma *et al.*, 2005, Kanga *et al.*, 2005, Druyan 2010, Morton *et al.*, 2014). En effet la variabilité climatique est le plus important facteur de l'évolution du taux de recharge des aquifères et les précipitations constituent la composante dominante dans le bilan de l'eau dans un bassin (Healy et Scanlon, 2010). L'intensité des pluies et le volume d'eau pluviale jouent un rôle important dans la recharge des aquifères. L'importance des fortes pluies dans la recharge des eaux souterraines a été montrée en Afrique subsaharienne (Eilers *et al.*, 2007 ; Mileham *et al.*, 2009 ; Owor *et al.*, 2009 ; Taylor *et al.*, 2012).

Aujourd'hui, les villes africaines souffrent d'une pénurie d'eau (Mérino, 2008) qui devrait s'amplifier au cours des prochaines décennies à cause de leur croissance. D'après le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2013), d'ici 2030, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir d'un stress hydrique accentué par les changements climatiques en Afrique. Les taux de croissance de ces villes restent très importants, de l'ordre de 4 à 5% l'an : Ce qui augmente le taux de demande en eau.

Au Bénin, l'aquifère du plateau d'Allada exploité pour l'approvisionnement en eau des villes environnantes, est le plus grand des aquifères du continental terminal des trois plateaux qui occupent la moitié méridionale du bassin sédimentaire côtier du Bénin (Adjahossou, 2014 in Houenoussi, 2020). Il est donc fondamental de connaître la ressource souterraine potentielle de ce plateau ainsi que son renouvellement à travers une modélisation et une analyse de la variation des niveaux piézométriques.

Le présent document qui a pour thème : « **étude de l'altération du signal piézométrique annuel de recharge en fonction de la profondeur au niveau de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada dans un contexte de changement climatique** » s'inscrit dans le cadre de la fin de notre formation de master en Génie Rural et Maîtrise de l'Eau (GRME) à l'Institut National de l'Eau (INE) et a pour objectif d'apprécier le signal piézométrique en fonction de la profondeur.

### ➤ **Objectif général**

L'objectif général de cette étude est de modéliser le renouvellement de la ressource en eau de l'aquifère du Mio Pliocène du plateau d'Allada au Bénin et de l'évaluer suivant une modélisation numérique à l'aide du code FEFLOW (Finite Elements subsurface Flow system).

### ➤ **Objectifs spécifiques**

Spécifiquement, il s'agira de :

- Déterminer le volume de recharge capable d'engendrer les fluctuations du niveau piézométrique sur le plateau d'Allada ;
- Évaluer l'impact de la profondeur du niveau de l'eau sur le plateau d'Allada ;
- Analyser l'impact des conséquences du changement climatique sur l'évolution des signaux piézométriques sur le plateau d'Allada.

### ➤ **Hypothèses**

Les hypothèses qui soutiennent les objectifs spécifiques fixés pour l'étude sont les suivantes :

- Les fluctuations de la nappe sont fortement influencées par la recharge ;
- La recharge sur le plateau d'Allada varie en fonction de la profondeur du niveau de l'eau ;
- Les changements climatiques induisent des modifications importantes sur la ressource en eau souterraine.

### ➤ **STRUCTURATION DU DOCUMENT**

Le plan de ce travail se décline en 4 chapitres, hormis l'introduction générale, la conclusion et les perspectives.

- Le premier chapitre porte sur la Revue de littérature,
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude,
- Le troisième chapitre aborde l'Approche méthodologique,
- Le quatrième présente les Résultats et la Discussion.

## **Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE**

## 1-1 Clarification de quelques concepts

### 1-1-1 Eau

L'eau, encore appelée « or bleu » est une ressource naturelle vitale aux êtres vivants sur la terre en général et à l'homme en particulier (Oré, 2016 ; in TICOUTCHIKA (2021) ; elle est une ressource vulnérable et limitée, rare et précieuse et massivement présente sur la terre grâce à son renouvellement qui passe par son cycle. Sa gestion pour un développement durable devient une question d'actualité. La figure 1 présente le schéma du cycle de l'eau.

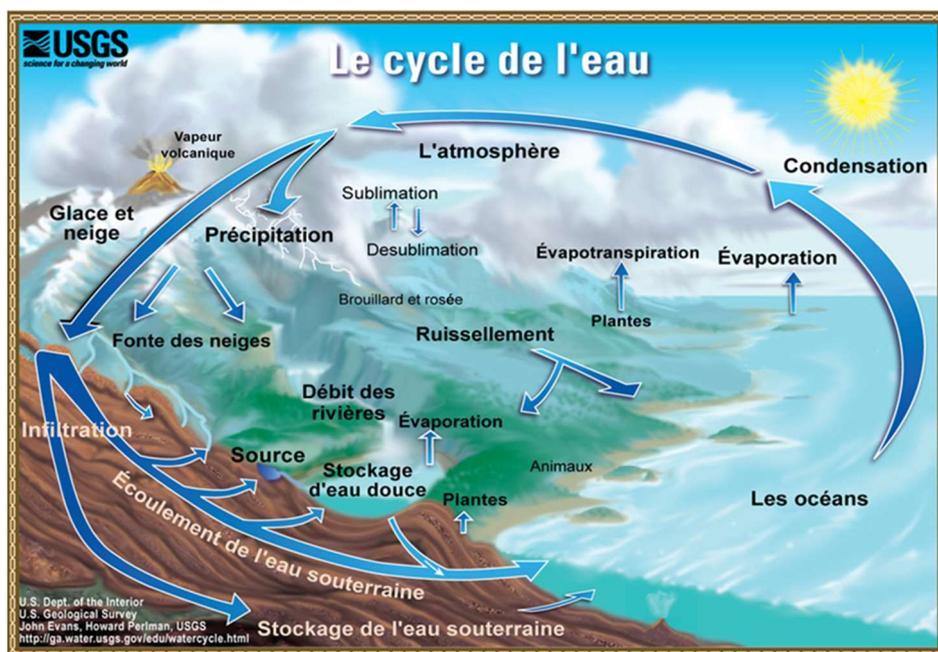


Figure 1 : Schéma du cycle de l'eau

Source : Plateforme USGS, 2008

### 1-1-2 Ressource en eau

Les ressources en eau sont les masses d'eau qui existent sur la planète, des océans aux rivières, en passant par les lacs, les ruisseaux et les lagunes. La ressource en eau désigne la quantité ou la réserve d'eau dont un utilisateur peut faire usage. De toutes les ressources, les ressources en eau sont les plus vulnérables et les plus menacées du fait que les conditions climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques rendent leur gestion très complexe (PAP/CAR, 1998). Sont considérées comme ressources en eau dans le cadre de cette recherche, les eaux superficielles et les eaux souterraines du Plateau d'Allada utilisées pour divers usages. C'est aussi l'ensemble de toutes les eaux accessibles comme ressources, c'est-à-dire utiles et disponibles pour l'être humain, les végétaux qu'il cultive, le bétail qu'il élève et les écosystèmes, à différents points du cycle de l'eau. Cette ressource est limitée en quantité et en qualité (surtout en saison sèche).

Elle est indispensable à la vie et à la plupart des activités humaines, telles que l'agriculture, l'industrie et aux usages domestiques (alimentation en eau potable). Elle est vitale pour le fonctionnement des écosystèmes. Nous distinguons les deux types à savoir :

➤ **Eau Superficielle**

Les eaux de surface, également appelées eaux superficielles, sont constituées, par opposition aux eaux souterraines, de l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées qui sont en contact direct avec l'atmosphère, se trouvant à la surface ou proches de la surface du sol : cours d'eau, océans, mers, lacs et des eaux de ruissellement (Orban et brouyère, 2022).

➤ **Eau Souterraine**

C'est l'ensemble des eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol ; de l'eau emmagasinée dans les interstices d'un milieu poreux. Elle constitue donc une zone saturée en eau emmagasinée dans la porosité du milieu géologique récepteur (Orban et brouyère, 2022).

### **1-1-3 Aquifère**

C'est un sol ou une roche réservoir originellement poreuse ou fissurée, contenant une nappe d'eau souterraine et suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement en quelle que sorte une unité géologique suffisamment poreuse et perméable pour emmagasiner et fournir une quantité significative d'eau (le contenant) ; cette unité géologique est, en partie saturée en eau (Orban et brouyère, 2022).

### **1-1-4 Nappe phréatique**

C'est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable. C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface. On distingue la nappe libre et la nappe captive (Orban et brouyère, 2022).

### **1-1-5 Nappe libre**

C'est un aquifère ou volume d'eau souterraine dont la surface est libre c'est-à-dire à la pression atmosphérique, une nappe d'eau souterraine dont le niveau supérieur peut varier sans être bloqué par une couche imperméable supérieure. Elle circule sous un sol perméable, elle est généralement peu profonde et sa surface est à pression atmosphérique, comme le cas de l'eau dans les puits (Orban et brouyère, 2022).

### 1-1-6 Nappe captive

C'est une nappe qui est surmontée par une formation peu perméable où la surface aquifère est très poreuse et dont la charge hydraulique (surface piézométrique) de l'eau qu'elle contient est supérieure au toit de la nappe. Elle est sous pression.

Elle est aussi un aquifère ou volume d'eau souterraine généralement à une pression supérieure à la pression atmosphérique car isolée de la surface du sol par une formation géologique peu perméable, en pratique le niveau d'eau est supérieur au toit géologique de la couche aquifère. La figure 2 ci-dessous présente les deux types de nappe et aussi la zone saturée.

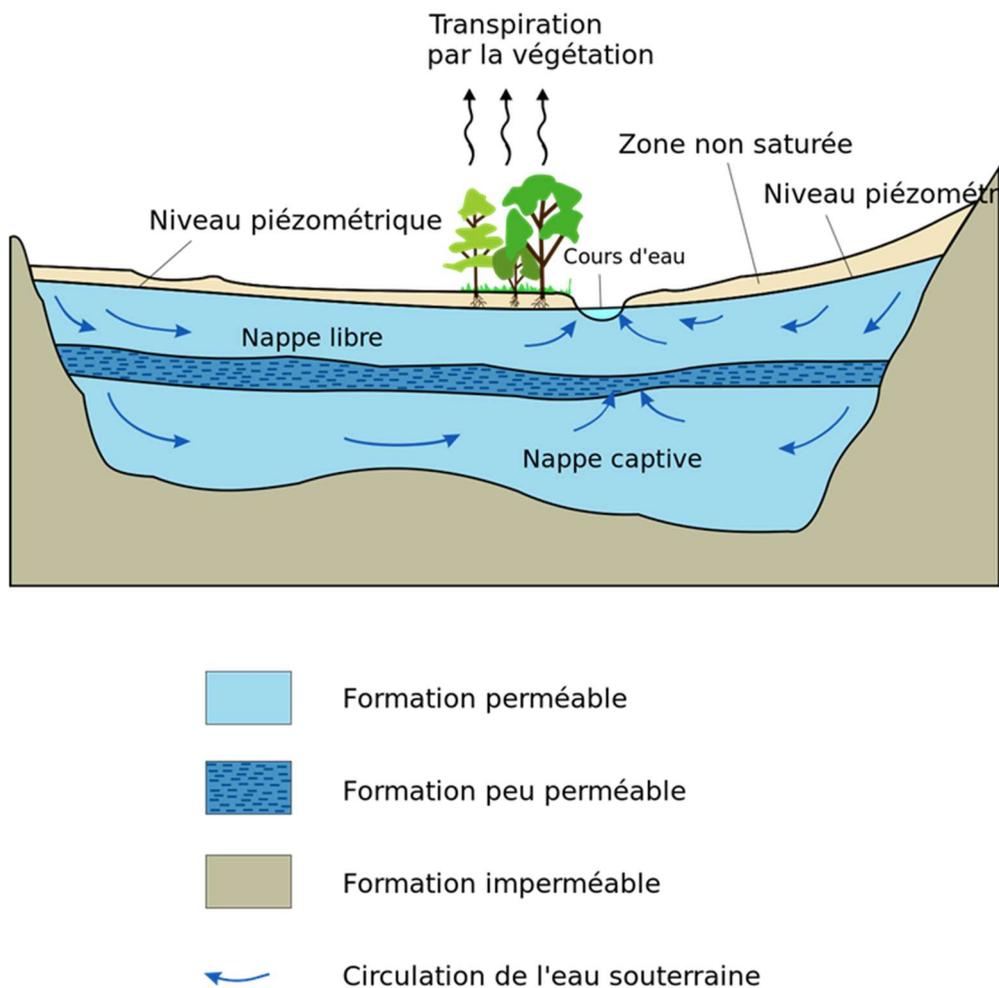


Figure 2 : Les deux types de nappe  
Source : SAGE, (2008)

### 1-1-7 Mio – Pliocène

Il s'agit d'une formation continentale très hétérogène constituée essentiellement de sables, d'argiles, de conglomérat et de marnes azoïques (Hachaichi Zohra, 2018).

### **1-1-8 Recharge de la nappe**

C'est la pénétration profonde des eaux à travers le sol ou les roches sous-jacentes jusqu'à la nappe phréatique, soit sous l'action naturelle de la pesanteur, soit du fait d'une injection forcée, c'est en quelque sorte l'alimentation de la nappe (Orban et brouyère, 2022) .

### **1-1-9 Zone saturée**

C'est une zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches formant dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine. Son contraire est la zone non saturée (Orban et brouyère, 2022).

### **1-1-10 Zone non saturée**

C'est la zone du sous-sol non complètement saturée en eau (coexistence de l'eau et de l'air dans les interstices de la roche) au-dessus de la surface d'une nappe libre et où les écoulements se font de manière verticale.

Aussi, cela indique une zone d'aération du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. Elle est importante pour mesurer la teneur en eau d'un écosystème. Cette zone insaturée est aussi appelée la zone vadose (Orban et brouyère, 2022).

### **1-1-11 Piézométrie**

C'est la mesure de la profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine (Orban et brouyère, 2022). Elle est exprimée soit par rapport au sol en m, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en NGF (Nivellement Général Français). La surface de la nappe correspond au niveau piézométrique.

### **1-1-12 Climat**

Le climat est l'ensemble des conditions atmosphériques et météorologiques d'une région géographique donnée pendant un temps donné. Il se distingue selon les régions (équatoriale, tropicale, tempérée, etc.). Il est aussi défini comme la synthèse des phénomènes météorologiques observés sur l'ensemble d'une période statiquement longue pour pouvoir établir ses propriétés statistiques d'ensemble à savoir : valeurs moyennes, variances, probabilités des phénomènes extrêmes, etc.

Il s'agit plus précisément d'une description statistique en fonction de la moyenne et de la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Dans un sens plus large, le climat est la description statistique de l'état du système climatique.

### **1-1-13 La variabilité climatique**

Elle est la caractéristique inhérente au climat qui se manifeste par des changements et déviations dans le temps (IPCC, 2007). Ainsi la variabilité climatique est une modification naturelle du climat et donc indépendante des activités humaines. Elle est l'un des phénomènes les plus importants de notre époque. En Afrique, elle représente une grande menace pour la croissance et le développement durable, ainsi que pour l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). En effet, selon IPCC (2007), les communautés pauvres seront les plus vulnérables du fait de leurs capacités d'adaptation limitées et leur grande dépendance de ressources à forte sensibilité climatique telles que les ressources en eau et les systèmes de production agricole. En cas d'échec, les 40% de la population mondiale la plus pauvre, soit environ 2,6 milliards de personnes, seront condamnées à un futur comportant moins d'opportunités (PNUD, 2007). Dans la plupart des pays et régions de ce continent, on s'attend à ce que la production agricole et l'accès à la nourriture soient sérieusement compromis par la variabilité du climat. Au Bénin où l'agriculture constitue la base de l'économie avec une contribution de 36 % au Produit Intérieur Brut et de 88 % aux recettes d'exportation (Houssou, 2014), les impacts négatifs du changement climatique ne sont plus à démontrer. Les travaux de Ogouwalé (2006), Vissin (2007) et Koumassi (2014) ont montré que les climats du Bénin sont caractérisés par une variabilité pluviométrique, de ce fait, l'agriculture subit de plein fouet, les contrecoups de la variabilité climatique. Par conséquent, le secteur agricole se trouve confronté à des baisses de rendement de plus en plus remarquables du fait des pratiques culturales utilisées (GIEC, 2007).

### **1-1-14 Les changements climatiques**

Ils représentent toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines (IPCC, 1996). Cette définition est différente de celle de la convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, qui la perçoit comme étant des phénomènes attribués directement ou indirectement à une activité humaine, altérant la

composition de l'atmosphère mondiale, et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observés au cours des périodes comparables.

Selon le GIEC, les changements climatiques peuvent être définis comme étant « une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement de l'ordre des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance de variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols ».

## **1-2- Hydrogéologie du plateau d'Allada**

### **1-2-1 Le Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin**

Le bassin sédimentaire côtier du Bénin comporte quatre aquifères superposés, séparés l'un de l'autre par des ensembles argilo-marneux (figure 3). Dans le département de l'Atlantique, les aquifères à nappe libre du Continental Terminal et celui à nappe captive du Crétacé Supérieur sont les plus importants. Quant aux aquifères du Quaternaire et du Paléocène, ils ont des potentialités relativement limitées en matière de la productivité en eau.

L'eau de consommation de la commune d'Abomey-Calavi et de Cotonou est entièrement puisée dans les aquifères du Continental Terminal. On distingue dans cette commune, plusieurs horizons aquifères plus ou moins différenciés. Ils sont identifiés approximativement dans les deux cents premiers mètres et constitués d'un horizon superficiel (aquifère superficiel) et de trois horizons inférieurs (aquifères inférieurs) séparés les uns des autres par des couches d'argiles discontinues (UNESCO, 2004).

### **1-2-2 Système aquifère du Sud-est du plateau d'Allada et de la plaine côtière adjacente.**

- Aquifère superficiel

Les réservoirs de cet aquifère sont constitués par :

- une mince couche de sable à granulométrie grossière située juste à la base de la terre de barre sur le plateau ;
- un Cordon de sables jaunes, gris et bruns dans la plaine littorale. Leurs épaisseurs varient de 10 à 20 m au maximum.

D'une structure homogène, et à nappe libre, l'aquifère superficiel repose sur une couche plus ou moins argileuse qui le sépare de l'aquifère inférieur.

- Système aquifère inférieur

Il est constitué de trois horizons plus ou moins distincts dont les réservoirs respectifs sont relativement hétérogènes. Ces horizons aquifères sont compris dans des couches de sable et de gravier dont l'épaisseur varie considérablement d'un endroit à un autre. Les aquifères sont séparés en fait par des couches d'argile plus ou moins silteuses à sableuses qui se comportent par endroits comme du matériel semi-poreux ou poreux entraînant des communications hydrauliques entre les horizons. L'eau de consommation de la commune d'Abomey-Calavi et de Cotonou est entièrement puisée dans les aquifères du Continental Terminal à partir de champs captant de Godomey et de Ouèdo. Par ailleurs, les analyses cumulées des cartes hydrogéologiques du Bénin au 1/500000ème et du bassin sédimentaire côtier au 1/200000ème révèlent que les ouvrages de captage réalisés dans la commune exploitent les ressources contenues dans deux aquifères continus. De bas en haut nous avons :

- L'aquifère des sables (fins à grossiers), de grès et de graviers avec des niveaux argilo sableux (rouge latéritique, bariolé, noire ou colorés) du Continental Terminal. En effet, c'est cet aquifère qui est sollicité pour la plupart des forages et certains puits modernes de notre zone d'étude ;

- L'aquifère fait de sables gravillonnés, d'argile et d'alluvions argilo-sableux du Quaternaire, est un aquifère superficiel, généralement exploité par des puits à grand diamètre retrouvés pratiquement dans la plupart des concessions de la commune (Terrabo, 2010). La figure 3 ci-dessous présente la carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

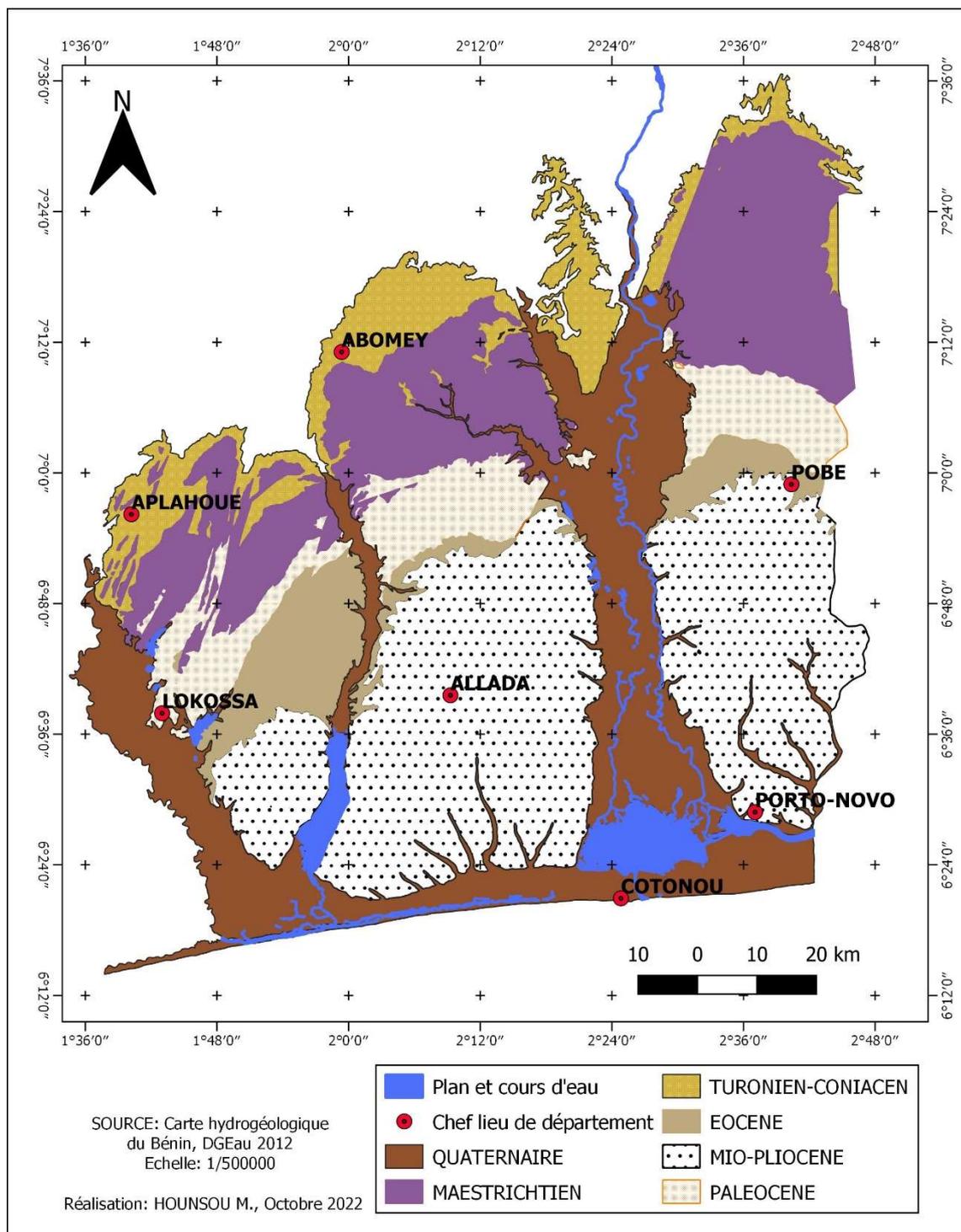


Figure 3 : Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin.

Cette figure montre les différents aquifères du bassin sédimentaire côtier : le quaternaire, le maestrichtien, le turonien-coniacien, l'écène, le Mio- pliocène et le paléocène.

## **Chapitre 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

## **2-1- Situation géographique**

Le plateau d'Allada est l'un des plateaux du bassin sédimentaire situé au Sud de la dépression de la Lama. La figure 4 ci-dessous présente la carte du plateau d'Allada.

D'une altitude de 100 m en moyenne (Adam et Boko,1993), il est situé dans le département de l'Atlantique, est limité au Nord par le département du Zou, à l'Est par le département de l'Ouémé, au Sud par le département du Littoral et la commune de Ouidah, et à l'Ouest par les départements du Mono, et du Couffo. Le plateau d'Allada se situe dans le grand bassin sédimentaire côtier des pays du Golfe de Guinée entre 6°21 et 6°50 de latitude Nord, et entre 2°00 et 2°20 de longitude Est (Figure 4). Il couvre une superficie de 2140 km<sup>2</sup>, soit plus de 66% de la superficie totale du département de l'Atlantique (Dissou, 1986). Il regroupe huit (8) communes, que sont Allada, Abomey calavi, Zè, Sô-Ava, Toffo, Tori, Kpomassè et une partie de Ouidah (figure 4).

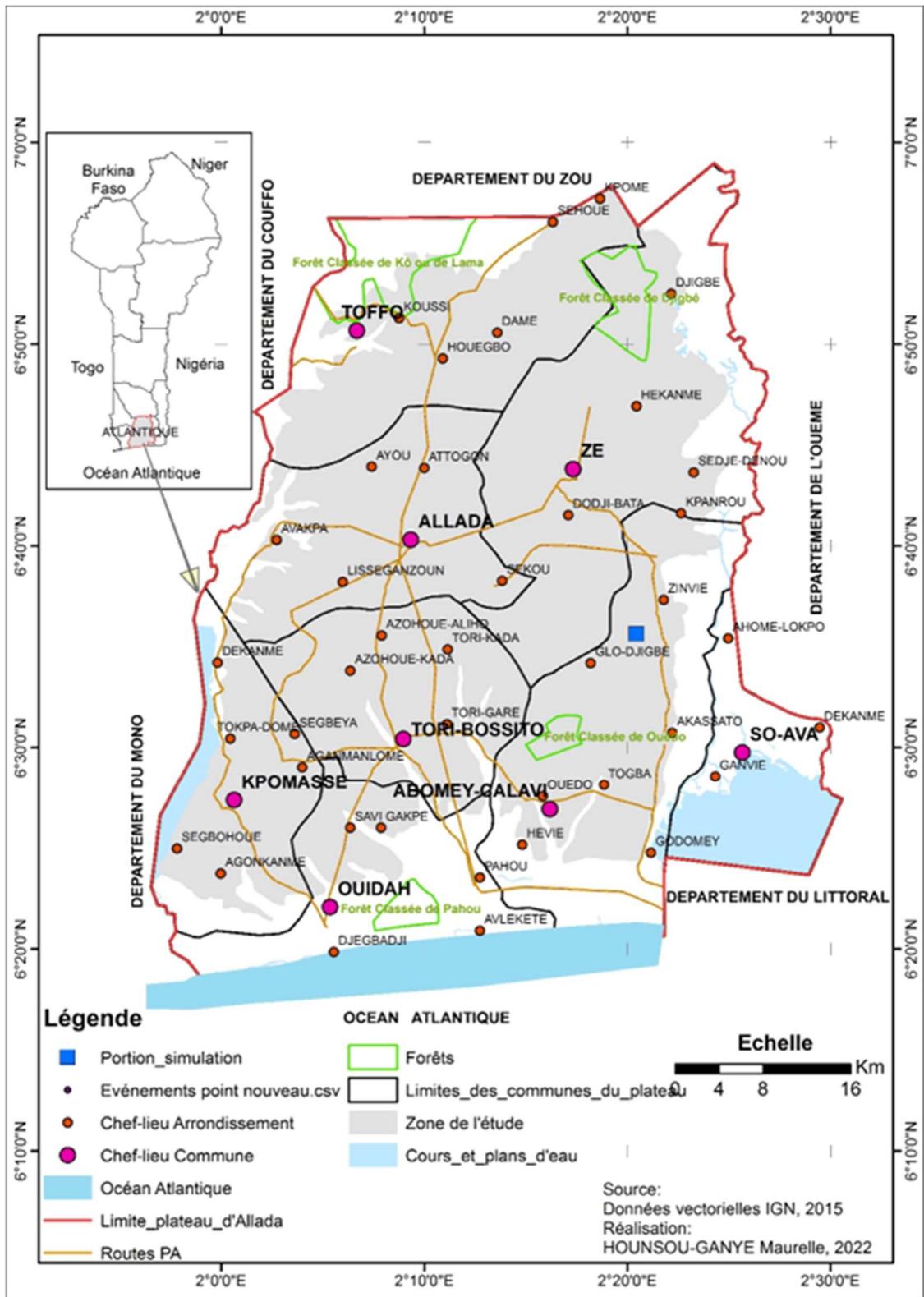


Figure 4 : Situation géographique du plateau d'Allada

## **2-2- Milieu humain**

La population du plateau d'Allada est dominée par les ethnies Aïzo et fon qui représentent respectivement 41% et 31% des habitants (INSAE/RGPH3, 2002). On rencontre aussi les groupes minoritaires comme les « Toffi », les « Adja », les « Pédah », les « Yorouba »

## **2-3- Relief**

Le plateau d'Allada est formé d'un glacis de 2500 km<sup>2</sup> dont la limite au Nord est constituée par un escarpement en bordure de la dépression de Lama (Totin, 2003). Le plateau culmine à 180 m d'altitude à sa bordure nord, s'abaisse graduellement vers le Sud où il forme aux confins de la plaine côtière un système lagunaire. Cette topographie à faible pente du plateau est interrompue par endroits par des secteurs plats très étendus (Sogréah, 1997).

## **2-4- Contexte hydroclimatique**

Le Bénin dispose de deux types de climats. Dans la moitié Nord du pays on observe un climat soudanien et dans la moitié sud, un climat guinéen. Le plateau d'Allada se situe dans la zone dominée par le climat guinéen qui est un climat très humide influencé par les vents de mousson soufflant depuis le Golfe de Guinée. Les données hydro climatiques suivantes proviennent de la station d'Allada pour les données de pluies, et celle de Cotonou pour les données de températures. Elles couvrent la période allant de 2010 à 2015. Le climat sur le plateau d'Allada est caractérisé par deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses toutes réparties de façon inégale :

- mi-mars à mi-juillet : grande saison des pluies ;
- Mi-juillet à mi-septembre : petite saison sèche ;
- Mi-septembre à mi-novembre : petite saison des pluies ;
- Mi-novembre à mi-mars : grande saison sèche.

Les relevés pluviométriques de la station d'Allada, ont permis d'observer les hauteurs de pluies annuelles variant entre 674,5 et 1430,6 mm sur la période de 2010 à 2015 avec une moyenne annuelle de 1127,53 mm. La figure 5 montre les moyennes pluviométriques interannuelles enregistrées par la station météo de Niaouli (Allada) pour la même période.

Sur le plateau d'Allada, la température moyenne annuelle quant à elle est de 27,7 °C avec un maximum moyen de 33,4 °C observé durant le mois de février et un minimum moyen de 22,0 °C durant le mois de décembre (station de Cotonou).

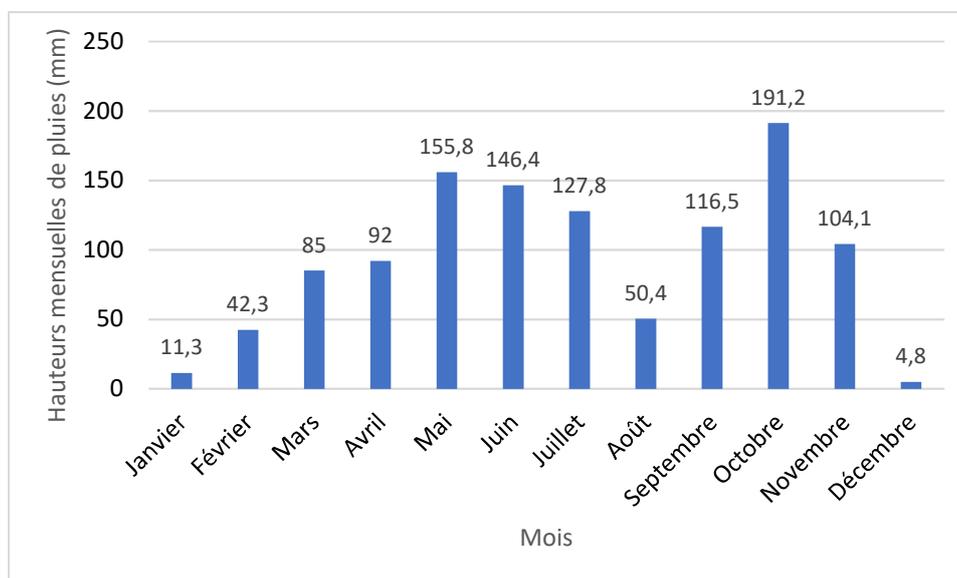


Figure 5 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie du plateau d'Allada de 2010-2015

Source : station météo de Niaouli (Allada), 2015

## 2-5- Contexte pédologique

La majeure partie du BSC auquel appartient le plateau d'Allada est recouverte de sols ferrallitiques, formés sur sédiments meubles argilo-sableux encore appelés terre de barre. La présence de ces sols serait liée à celle du Continental Terminal. Généralement, la teneur en argile de ces sols varie entre 5 et 15% en surface et passe à 35% entre 30 et 60 cm de profondeur puis à 45 et même 50% au-delà de cette profondeur (Azontondé 1991). La réserve en eau de ces sols est assez faible et varie entre 40 et 50 mm à 30 cm du sol puis entre 60 et 70 mm à 60 cm du sol (Azontondé 1991). Quant à l'indice d'érodibilité, il varie de 0,05 en surface à 0,1 en profondeur, alors que la perméabilité diminue depuis les horizons superficiels où elle varie entre 5 et 8 cm/h jusqu'aux horizons profonds atteignant 3 à 6 cm/h.

## 2-6 – Végétation

Si les grands plateaux du bassin sédimentaire côtier sont recouverts dans l'ensemble par une savane arborée, avec mosaïque de cultures et jachères sur Terre de barre, les rivages lagunaires de la plaine littorale, qui ont fait l'objet de nombreuses études écofloristiques (Mondjanagni,

1969, Paradis et Adjanooun, 1974, Paradis 1975, 1976, Texier *et al.*, 1980), comportent plusieurs types de végétations suscitées réparties en fonction du régime hydrologique des plans d'eau lagunaires des différentes régions :

- *Paspalum vaginatum* (graminées) et *Typha australis* (Tyaceaa), la fougère à *Acrostichum aureum* sur les rives saumâtres ; ce dernier serait un témoin d'une ancienne association végétale de mangrove ;
- *Echinochloa pyramidalis*, *Vitiveria nigrimana*, *Phragmites australis*, *Vossia cuspidata*, *Sesbania pubescens* (Papilionacé) et *Mitragyna ciliata* (Rubiace) sur les rives d'eau douce ;
- Les monticules sableuses non inondables sont recouvertes d'une végétation classique à *Mariscus ligulais*, *Andropogon gayanus* (graminé) et *Hyptis lanceolata* (labié) ;
- Les autres zones non inondables sont également plantées artificiellement de cocotiers : *Cocos nucifera* (Palmae) et de palmier à huile : *Elaeis guineensis* (Palmae) ; on y retrouve par endroits des vestiges de la forêt tropicale humide semi-décidue.

## **2-7- Cadre géologique du bassin sédimentaire côtier du plateau d'Allada**

Comme dans la plupart des bassins ouest-africains, le « Continental terminal », tel qu'il a été défini par Kilian (1993) recouvre en République du Bénin la majeure partie du bassin côtier (Hubert, 1998 ; Chetelat, 1926 ; Chermette, 1993 ; Besairie, 1943 ; Slansky, 1959).

Dans ce bassin, le « Continental terminal » est représenté par des formations conglomératiques et argilo-sableuses, effectivement continentales, reposant sur une série continue du Crétacé à l'Eocène moyen, voire supérieur ; cette dernière, marine ou continentale, a subi, au niveau de la discordance, une évolution pédogénétique en milieu continental.

Le BSC présente une structure monoclinale très faiblement inclinée vers l'océan ; de ce fait, le Crétacé affleure au Nord du bsc et on remonte la série Eocène quand on se dirige vers le Sud. La valeur des pendages ne dépasse guère 1%.

Les accidents tectoniques sont très peu visibles dans cette région. Slansky (1959) a cependant mis en évidence deux familles de failles dont la plus importante, d'orientation NNE-SSW et de 100 m de rejet, a un âge postérieur au Lutétien et antérieur au « Continental terminal » sensu stricto ; l'autre, d'orientation ENE-WSW, abaisse d'une quarantaine de mètres le compartiment nord.

### **Chapitre 3 : APPROCHE METHODOLOGIQUE**

Dans ce chapitre nous avons détaillé le matériel, les méthodes d'études, et fait le paramétrage des données et mise en œuvre du modèle utilisé.

### **3-1- Matériel**

Pour mener à bien notre étude, une recherche documentaire s'avère indispensable ;

- Recherche documentaire

La recherche documentaire a consisté à collecter les informations ayant rapport avec notre travail à partir des références bibliographiques trouvées parmi les thèses, les mémoires, les articles scientifiques, les rapports et autres documents. Elle a permis de mieux cerner le thème. Des données des paramètres hydrodynamiques du plateau sont utilisées.

Aussi, dans le cadre de cette étude, les principaux outils utilisés sont des logiciels de traitements statistiques et de logiciels SIG :

- L'estimation de la recharge a été réalisée grâce au logiciel Feflow version 6.2 ; c'est un logiciel de modélisation hydrogéologique, il a été exploité pour la modélisation hydrogéologique.

- Un GPS de type garmin 76CSx a été utilisé pour relever les coordonnées géographiques.
- Le Tableur Excel a été utilisé pour les données hydrométriques et climatiques et l'exportation des valeurs de recharge de la nappe.
- Le logiciel Word a été utilisé pour le traitement des données et la rédaction du mémoire.
- Logiciel ArcGIS c'est un logiciel d'information géographique (ou logiciels SIG) développé par la société américaine ESRI, il a été utilisé pour la génération de carte, le traitement des images satellitaires.

### **3-2- Méthodes**

#### **3-2-1- Modélisation Hydrogéologique**

La modélisation numérique constitue un moyen pour comprendre le fonctionnement actuel d'un système aquifère à l'aide de ses paramètres hydrodynamiques et prédire son comportement futur dans le but d'avoir des résultats. La modélisation d'eaux souterraines exige un certain nombre de modèles pour différents types de problèmes et d'applications (Trefry et Muffels, 2007).

- Présentation du code de modélisation FEFLOW

**FEFLOW** (version 6.2) est un logiciel de modélisation d'éléments finis capable de prédire le comportement de l'écoulement souterrain, mais aussi de simuler la recharge, la migration de contaminants ou de la chaleur dans l'eau souterraine.

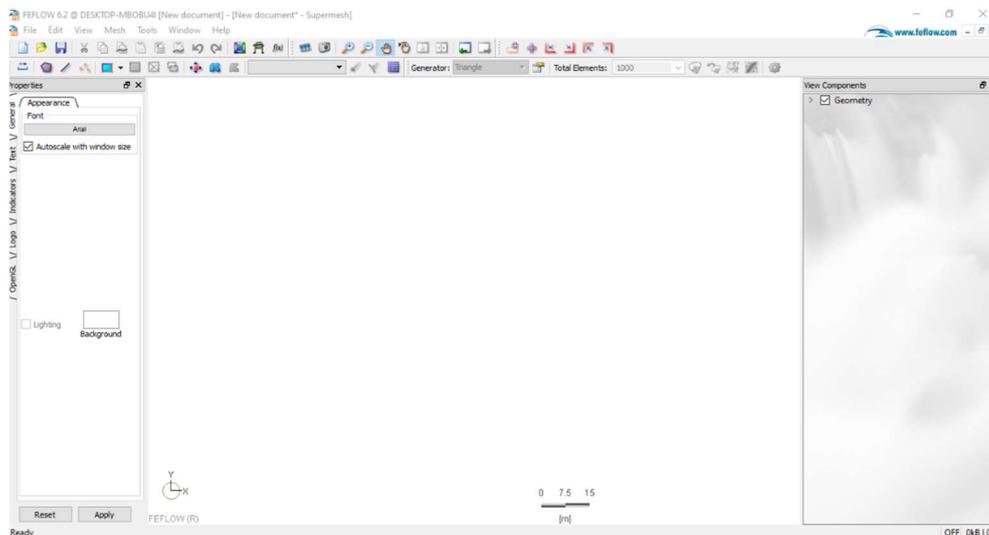


Figure 6 : Interface du logiciel Feflow

Il a été développé en 1979 par WASY (*Institute for Water Ressources Planning and Systems Research à Berlin, en Allemagne*) qui fait désormais partie du groupe DHI (bureau d'études indépendant spécialisé dans les domaines de l'eau, de l'environnement et de la santé). C'est un code de propriété industrielle qui n'est pas libre d'utilisation (Sana Ounaïs,2012). Il peut être utilisé à de simples études locales aussi bien que sur de larges et complexes cas d'applications.

FEFLOW offre plusieurs avantages pour la modélisation des phénomènes hydrogéologiques, à savoir :

- Possibilité de modifier localement le maillage sans modifier l'ensemble de la géométrie du modèle ;
- Capacité de représenter des conditions aux limites complexes ;
- Possibilité d'inclure des changements de propriétés comme par exemple la conductivité hydraulique.

### 3-2-2- Processus de modélisation sur feflow

Dans le cadre de ce travail, il nous est fondamental de connaître la ressource souterraine potentielle de ce plateau ainsi que son renouvellement à travers une modélisation et une analyse de la variation des niveaux piézométriques. Cette modélisation numérique constitue

un moyen pour comprendre le fonctionnement actuel du système aquifère et prédire son comportement futur.

Ainsi, avant de commencer la simulation il faudrait avoir une base de données dans laquelle les fichiers conçus seront sauvegardés. Pour ce fait, il faut créer les répertoires suivants : Femdata, Supermesh, Import+export et Results.

### ➤ **Domaine d'étude**

Cette étape a permis de créer un domaine dans notre milieu d'étude qu'est le plateau d'Allada. Pour notre étude, nous avons pris une portion de l'aquifère de forme carré avec 1000 m de côté ; Nous avons choisi le 3D car nous voulons voir comment la recharge évolue en fonction de la profondeur.

Pour avoir le domaine nous avons :

- créé un polygone de coordonnées :  $(0,0)$  ;  $(0,1000)$  ;  $(1000,1000)$  ;  $(1000,0)$  ;  $(0,0)$  (Figure 7).
- Insérer un puits  $(500,500)$  au centre du domaine qui permettra après le maillage de placer des points d'observations.

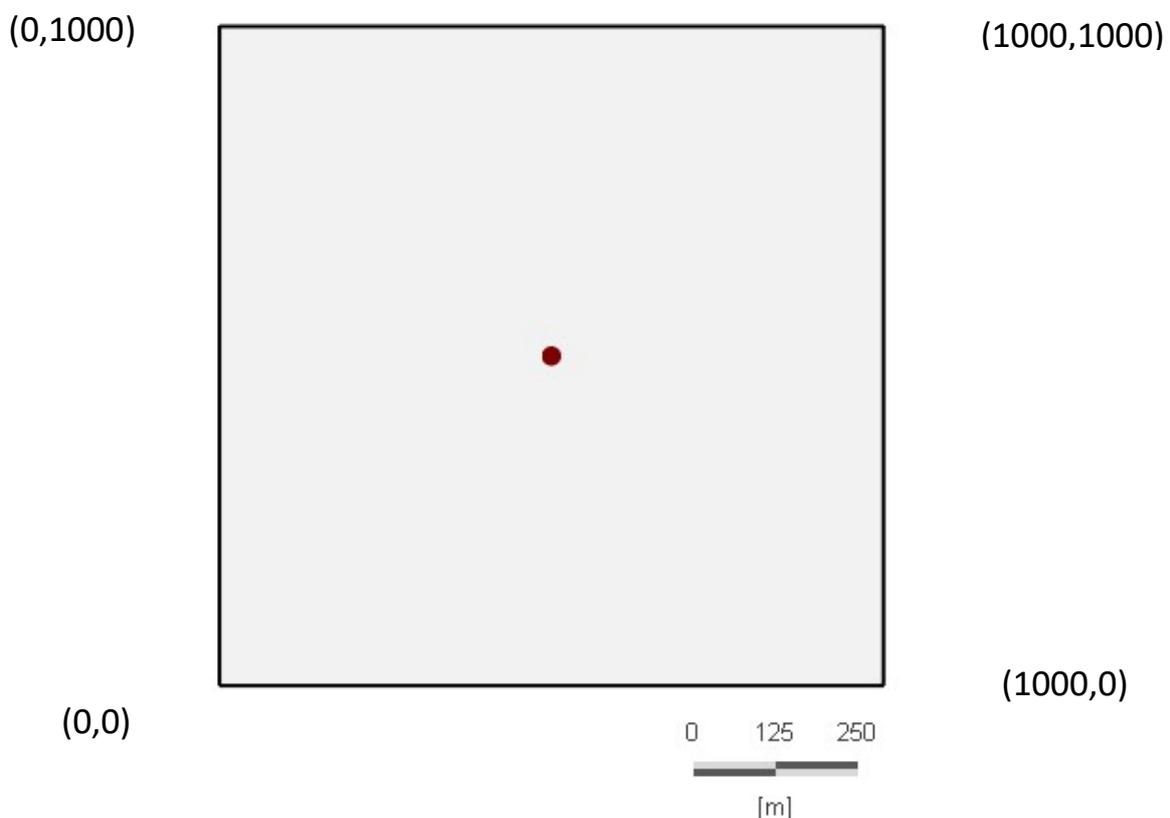


Figure 7 : portion de la zone d'étude

Source : Nos travaux, Mars 2022

Il est suivi du maillage du domaine et la représentation en 3D.

➤ **Maillage**

Le maillage a permis de représenter le domaine en éléments finis car plus le maillage est fin plus les solutions seront précises.

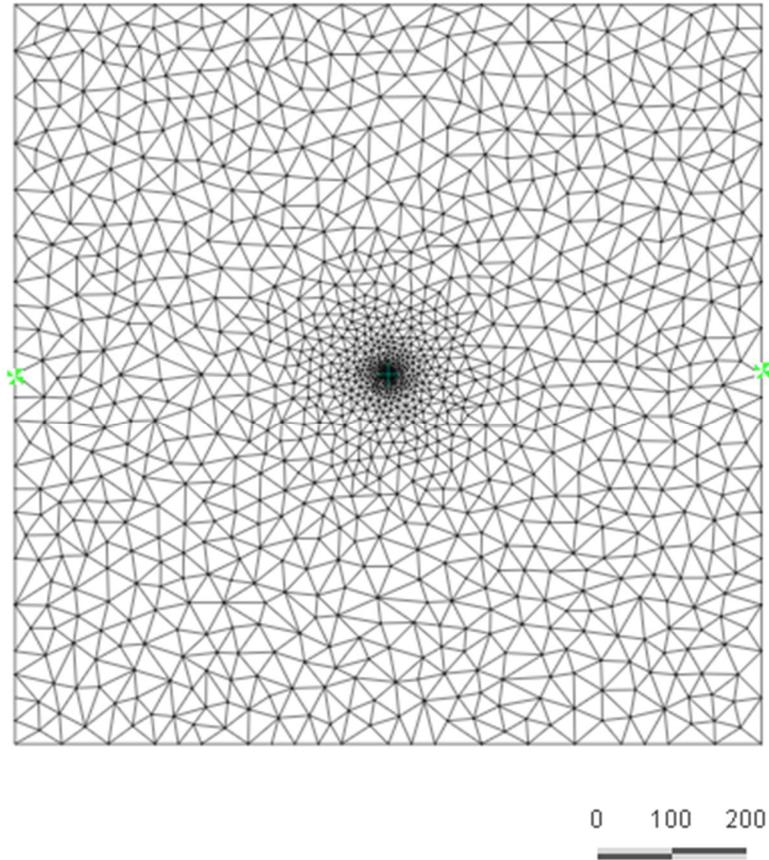


Figure 8 : maillage de la zone

Source : Nos travaux, Mars 2022

- **Représentation du domaine en 3D**
- Nous avons effectué la simulation sur huit couches au total.

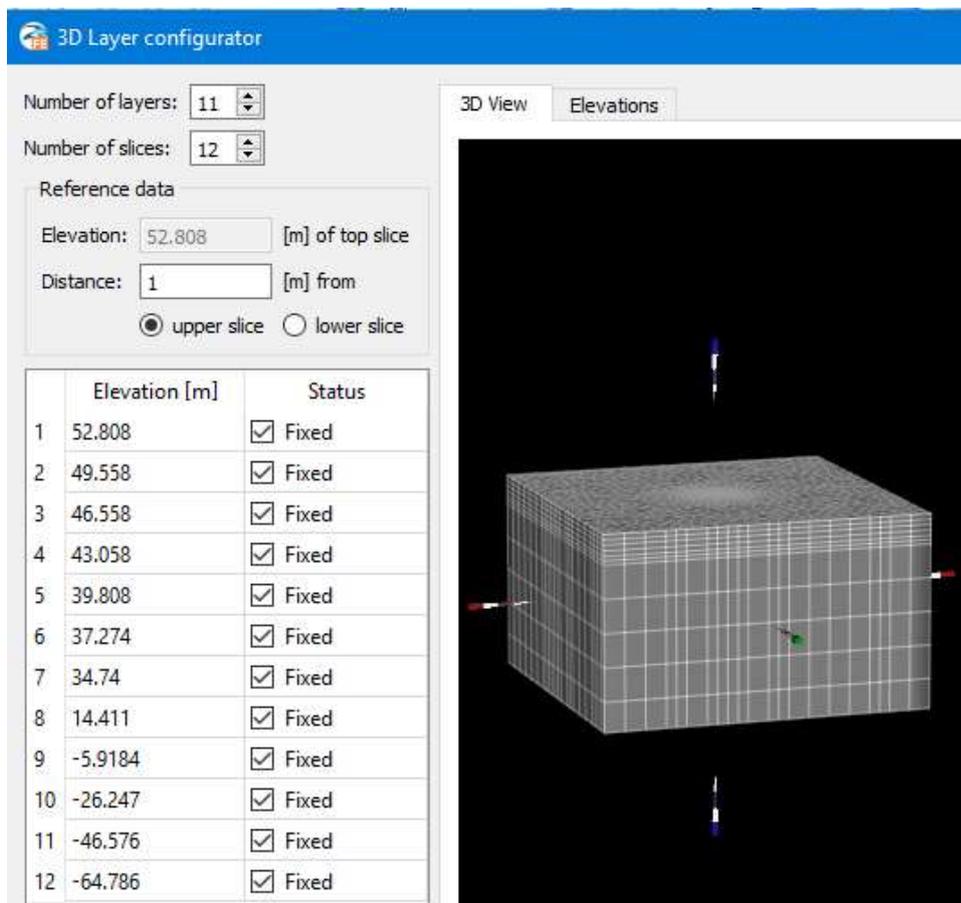


Figure 9 : Fixation et représentation en 3D des slices

Source : Nos travaux, Mars 2022

➤ **Paramètres physiques**

Il faut des données pour modifier les paramètres (équation, type de régime, temps de simulation...) dans problem class.

➤ **Conditions aux limites (Boundary conditions)**

Comme conditions aux limites, c'est l'équation type II nous avons utilisé, ainsi nous avons un flux nul jusqu'au-dessus de la nappe avec une charge hydraulique de 24,4924 suite au niveau de l'eau.

➤ **Caractéristiques physiques**

Les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère utilisés lors de la modélisation avec feflow (valeur et unités), modifier les valeurs de la conductivité hydraulique, les paramètres de Van genuchten et la porosité ainsi que leurs unités au niveau de materials properties.

## - Paramètres hydrodynamiques

Nous sommes passées par cinq étapes dans notre simulation avant d'obtenir des résultats. La simulation a été effectuée en variant le niveau statique sur huit slices sur une période de 10ans. Mais nous avons choisi douze (12) couches au départ. L'altitude de ces douze (12) couches est représentée dans le tableau 1

Tableau 1 : Elevation des slices

<b>Slices</b>	<b>Altitudes des slices (m)</b>
1	52.808
2	49.558
3	46.308
4	43.0
5	39.808
6	37.2737
7	34.7395
8	14.4105
9	-5.91841
10	-26.2473
11	-46.5763
12	-64.7856

La nappe a été subdivisée en deux parties : une partie constituée de la terre de barre et du sable grossier. Ainsi de la couche 1 à la couche 4 (52.808 à 43.0), on n'a rien que de la terre de barre et de la couche 5 à la couche 12 du sable grossier (39.808 à -64.7856).

L'élévation des slices constitue l'altitude des slices par rapport au niveau 0.

➤ **Conductivité hydraulique**

$$K = k * \rho \frac{g}{\mu}$$

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}: \begin{cases} \text{Layer 1,2,3,4} = 1.1 \text{ E}^{-05} \text{ m/s} \\ \text{Layer 5.....12} = 7.4 \text{ E}^{-05} \text{ m/s} \end{cases}$$

**Porosité :**

$$m = \frac{V_v}{V_t} * 100$$

$$\emptyset \begin{cases} \text{Layer 1,2,3,4} = 0.05 \\ \text{Layer 5.....12} = 0.065 \end{cases}$$

**Porosité à saturation  $S_s = 1$  (100%)**

$$\text{Porosité résiduelle } S_r \begin{cases} \text{Layer 1,2,3,4} = 15\% \text{ de } 0.05 = 0.0075 \\ \text{Layer 5.....12} = 15\% \text{ de } 0.065 = 0.00975 \end{cases}$$

➤ **Paramètres de Van Genuchten**

$$\alpha = 4.1 ; n = 1.964$$

Cette fonction est utilisée pour décrire la courbe de rétention d'eau du sol.

$$\alpha : 4,1$$

$$n : 1.96$$

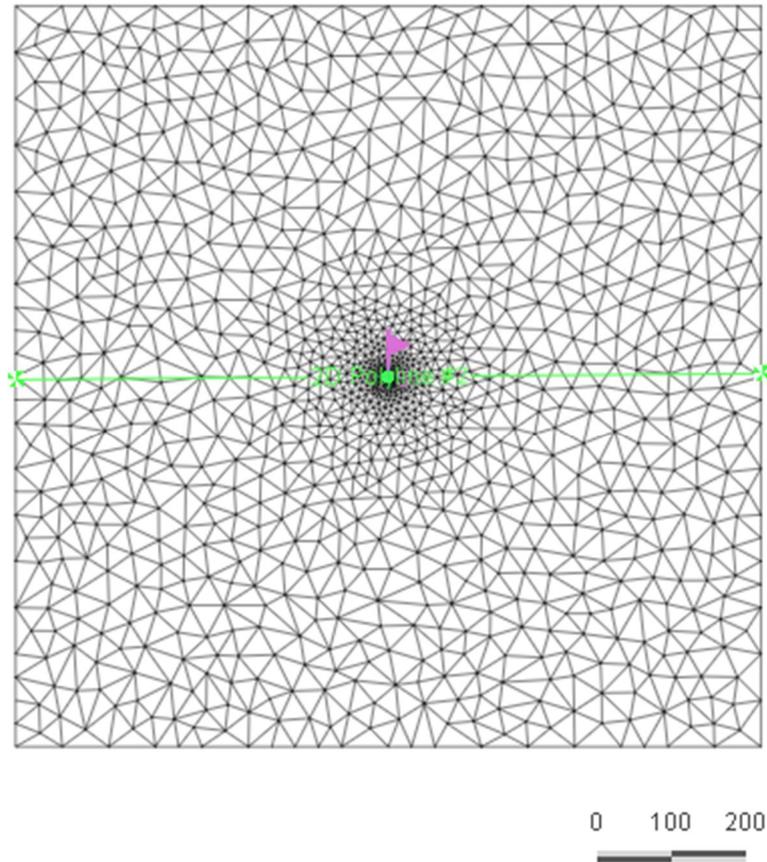


Figure 10 : Points d'observation  
 Source : Nos travaux, Mars 2022

- Il faut ensuite placer des points d'observations au même endroit (pas trop éloignés de 500,500, là où nous avons placé le puits d'observation) sur les huit slices.

Pour ce faire, nous avons choisi un élément raffiné afin d'avoir les coordonnées répondant à peu près aux coordonnées du puits de départ et placer enfin les points sur les huit couches.

#### - **Section du domaine**

Cette étape consiste à sectionner le domaine en 2d afin de bien observer comment les paramètres évoluent dans la profondeur, voir les lignes de courants (draw choisir 2d, cross view sections).

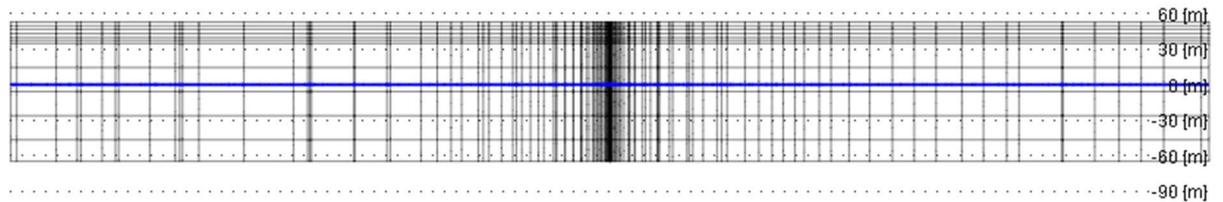


Figure 11 : section en 2D

Source : Nos travaux, Mars 2022

Cette section traverse toutes les slices avec des points d'observations au centre de chaque slice.

➤ **Revenir en régime transitoire**

Cette étape consiste à changer le régime au niveau de problem class.

• **Modification de problem class**

Pour voir le comportement des paramètres et l'écoulement de l'eau dans la zone non saturée, il nous a fallu revenir en régime transitoire afin d'éviter des biais dans les résultats et choisir le temps initial de simulation et la période sur laquelle on pourra voir un résultat.

- Revenir en régime transitoire ;
- Donner un temps pour notre simulation, le début et la fin ainsi que le pas de temps voulu ;
- Importer notre fichier recharge comportant le temps et la recharge que nous voulons simuler. Et donner une allure à la course ;
- Choisir la fonction recharge dans data et faire apparaître au niveau des fonctions.

## **Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION**

#### 4-1- Estimation de la recharge

Le tableau 2 présente l'estimation de la recharge faite sur 10ans.

Tableau 2 : Estimation de la recharge

- L'estimation a été faite sur 10 ans

Jours	Recharge (ml)						
0	0.00095249	791	0.00040998	1582	0.0004012	2373	0.00012949
30	0.00095249	822	0.00016483	1613	0.00045111	2404	3.58E-05
61	4.10E-04	852	0.0004012	1643	0.00012949	2435	5.40E-05
92	0.00016483	883	0.00045111	1674	3.58E-05	2463	0.00010464
122	0.0004012	913	0.00012949	1705	5.40E-05	2494	0.00021958
153	4.51E-04	944	3.58E-05	1733	0.00010464	2525	0.00044052
183	1.29E-04	975	5.40E-05	1764	0.00021958	2555	0.00067158
214	3.58E-05	1003	0.00010464	1794	0.00044052	2585	0.00095249
245	5.40E-05	1034	0.00021958	1825	0.00067158	2616	0.00040998
273	0.00010464	1064	0.00044052	1855	0.00095249	2647	0.00016483
304	0.00021958	1095	0.00067158	1886	0.00040998	2677	0.0004012
334	0.00044052	1125	0.00095249	1917	0.00016483	2708	0.00045111
365	0.00067158	1156	0.00040998	1947	0.0004012	2738	0.00012949
395	0.00095249	1187	0.00016483	1978	0.00045111	2769	3.58E-05
426	0.00040998	1217	0.0004012	2008	0.00012949	2800	5.40E-05
457	0.00016483	1248	0.00045111	2039	3.58E-05	2828	0.00010464
487	0.0004012	1278	0.00012949	2070	5.40E-05	2859	0.00021958
518	0.00045111	1309	3.58E-05	2098	0.00010464	2889	0.00044052
548	0.00012949	1340	5.40E-05	2129	0.00021958	2920	0.00067158
579	3.58E-05	1368	0.00010464	2159	0.00044052	2950	0.00095249
610	5.40E-05	1399	0.00021958	2190	0.00067158	2981	0.00040998
638	0.00010464	1429	0.00044052	2220	0.00095249	3012	0.00016483
669	0.00021958	1460	0.00067158	2251	0.00040998	3042	0.0004012
699	0.00044052	1490	0.00095249	2282	0.00016483	3073	0.00045111
730	0.00067158	1521	0.00040998	2312	0.0004012	3103	0.00012949
760	0.00095249	1552	0.00016483	2343	0.00045111	3134	3.58E-05
3165	5.40E-05	3285	0.00067158	3407	0.0004012	3530	5.40E-05
3193	0.00010464	3315	0.00095249	3438	0.00045111	3558	0.00010464
3224	0.00021958	3346	0.00040998	3468	0.00012949	3589	0.00021958
3254	0.00044052	3377	0.00016483	3499	3.58E-05	3619	0.00044052
						3650	0.00067158

Ces valeurs de recharge que nous avons utilisées pour faire la simulation sur 10ans. Cette recharge fait 5 % de la pluie moyenne mensuelle (Agires, OMIDELTA).

La figure 12 ci-dessous présente l'importation de la recharge dans l'interface de Feflow.

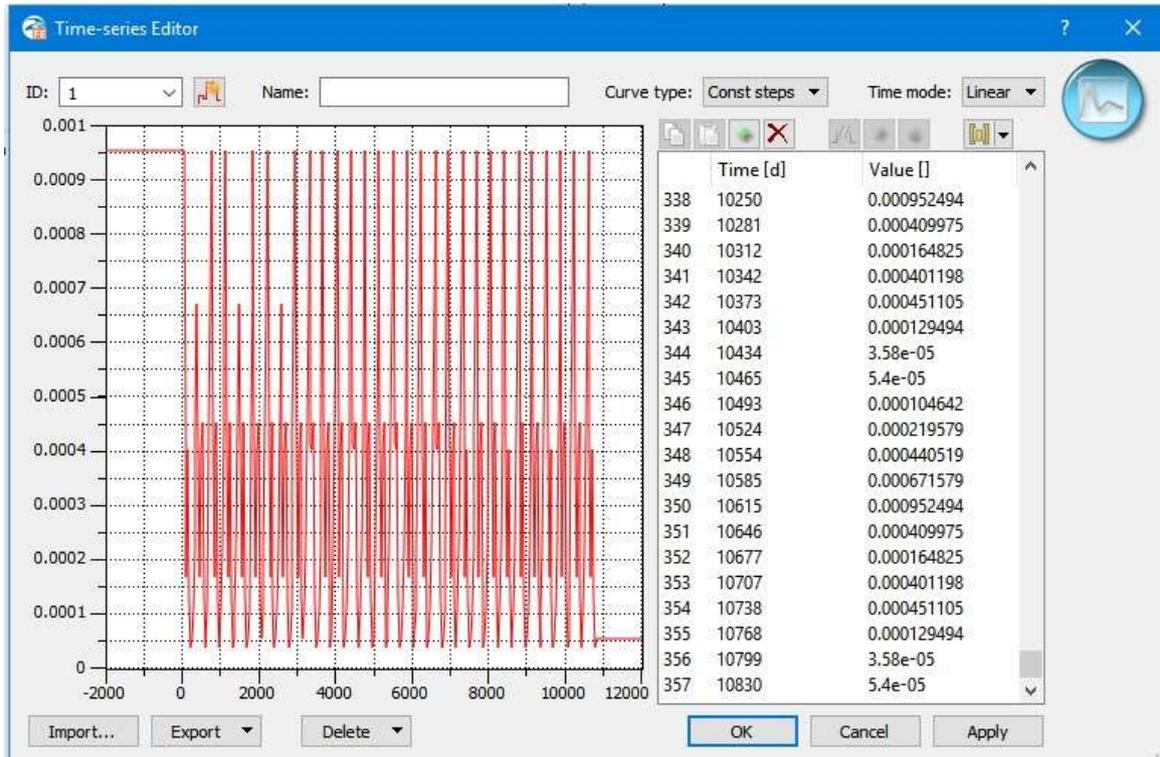


Figure 12 : Importation de la recharge dans le logiciel

- Chronique de recharge utilisée

Le graphe ci-dessous présente la chronique pluviométrique utilisée pour faire la simulation.

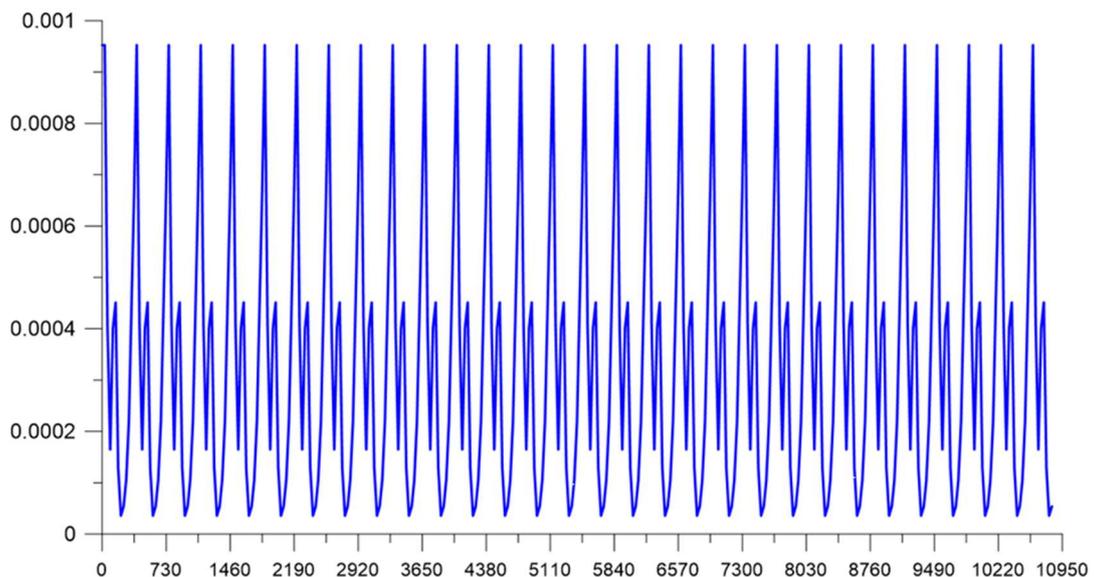


Figure 13 : Chronique de recharge utilisée en ml au bout de 30ans

## 4-2 Présentation et interprétation des résultats de la simulation sur 10 ans.

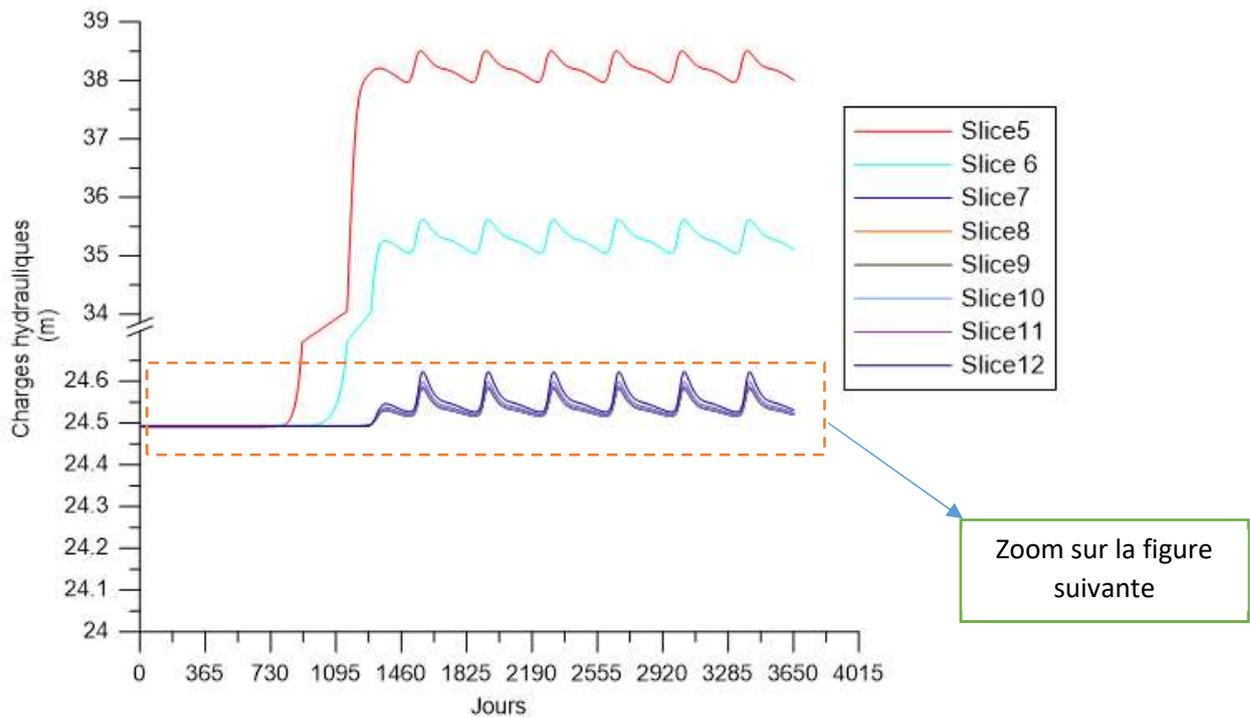


Figure 14 : Evolution de la charge hydraulique en fonction de la profondeur sur 10 ans

La figure 14 présente l'évolution de la charge hydraulique suivant une période de 3650 jours soit 10 ans.

Nous avons effectué une simulation en considérant le niveau de la nappe sur huit (8) différents slices ce qui nous a permis d'obtenir le graphe ci-dessus.

- Nous remarquons une évolution de la charge hydraulique avec un pic autour de 730 à 1460 jours pour le slice 5 qui est devenu constant avec des fluctuations du niveau de l'eau qui a augmenté considérablement de 14,01m de plus.
- Pour le slice 6 nous remarquons une évolution de la charge aussi avec un pic de 1095 à 1460 jours et un retour avec des fluctuations du niveau de l'eau.
- Le reste des slices étant confondus, un zoom a été fait afin de mieux voir ce qui se passe.

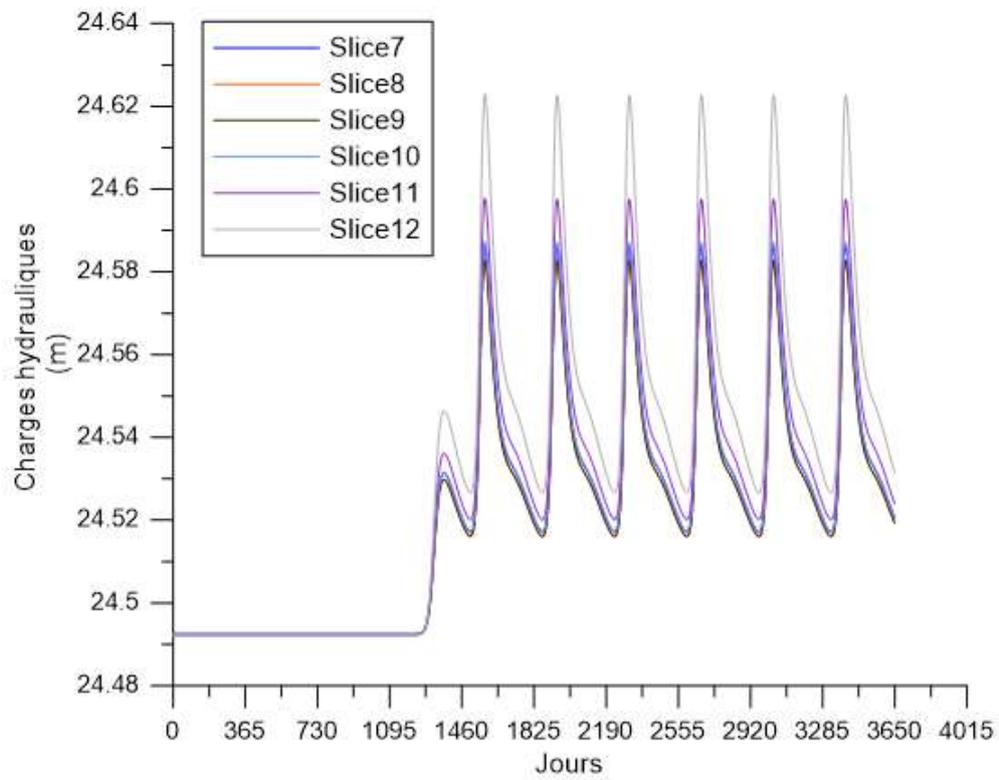


Figure 15 : zoom sur les slices 7 à 12

Le graphe ci-dessus présente le zoom sur les slices 7 à 12.

Nous remarquons après zoom, que les slices 7, 8, 9, 10, 11 et 12 ont la même allure avec une augmentation de la charge hydraulique autour de 0,14m.

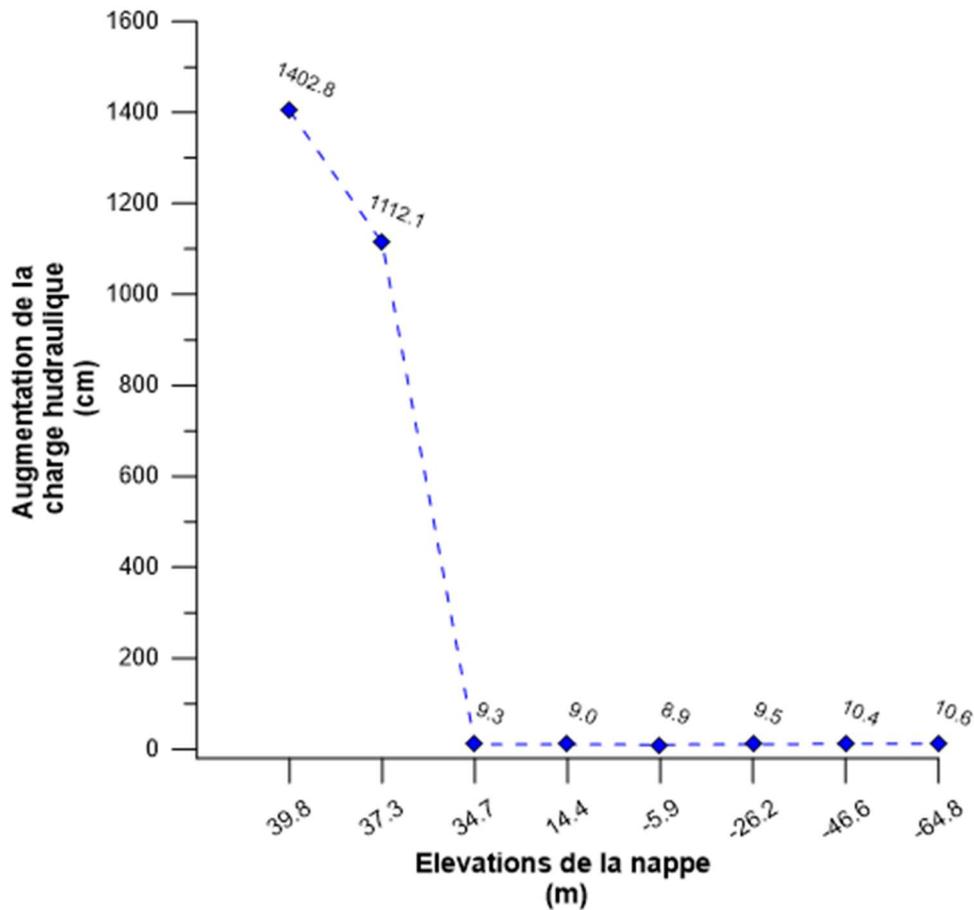


Figure 16 : Elévations de la nappe

Le graphe ci-dessus présente l'augmentation de la charge hydraulique sur les slices 5 à 12. Nous remarquons que les slices 5 et 6 possèdent les valeurs élevées de la charge hydraulique c'est-à-dire 1402,8 cm et 1112,1 cm respectivement tandis qu'à partir de la slice 7 jusqu'à 12 la charge hydraulique a complètement chuté.

Il y a augmentation de la charge hydraulique au niveau des niveaux statiques les moins profond (slice 5 et 6) jusqu'à 34.7 (slice 7 à 12) où on remarque que la recharge ne provoque pas une augmentation significative du toit de la nappe et les fluctuations piézométriques sont d'amplitudes plus faibles.

Ce qui nous amène à dire que plus la profondeur du niveau statique augmente moins la charge hydraulique augmente suite à la recharge ; lorsque le niveau de la nappe diminue (toit de la nappe plus proche de la surface, les fluctuations piézométriques sont plus forte suite à la recharge. Nous pouvons donc dire qu'il y a une faible recharge et que le signal piézométrique est fonction de la recharge qui elle-même dépend de la profondeur du toit de la nappe.

### **4-3 Influence de la recharge sur le niveau de la nappe**

La profondeur de la nappe sous le sol peut avoir une influence considérable sur la recharge (Degallier, 1967). Il a été en particulier démontré que la recharge diminue avec la profondeur de la nappe. En effet, une partie des eaux de pluies qui s'infiltrent dans le sol va être emmagasinée dans la ZNS jusqu'à concurrence du stock d'eau correspondant à la capacité de rétention après quoi le reste percole jusqu'à la nappe (Ndiaga Sow, 2005). Plus la profondeur de la nappe est importante, plus le stock d'eau nécessaire pour amener cette tranche de sol à la capacité de rétention est important et, par voie de conséquence, plus la recharge sera faible. Ce stock d'eau dépend de la nature du sol et de l'intensité de l'évaporation qui prévaut avant le début du processus d'infiltration. Il convient toutefois de signaler que dans certaines situations où la profondeur de la surface libre est très grande, le temps de réaction à une excitation pluviométrique peut être long et il est possible que cette recharge passe inaperçue, car le délai sera devenu trop grand pour qu'on puisse rattacher la fluctuation à sa cause.

La recharge des aquifères à nappe libre dépendrait essentiellement des événements pluviométriques excédant 10 mm/jour (Taylor et Tindimugaya, 2012).

Nous pouvons conclure que le signal piézométrique se dégrade en fonction de la profondeur, c'est-à-dire plus l'on évolue en profondeur moins le signal s'atténue.

### **4-4 Impact du changement climatique sur le signal piézométrique**

Le signal piézométrique est l'ensemble des fluctuations qu'enregistre le piézomètre une fois en contact avec l'eau. La recharge utilisée est issue des travaux de recherches réalisées sur le plateau. Ainsi d'après ces données, nous avons une recharge de 0.00498713 ml par an. C'est-à-dire la nappe reçoit de 0.00498713 ml par an sur une portion de 1km.

Le milieu d'étude étant une Zone Non saturée, la réalimentation des nappes nécessite une bonne connaissance de la ZNS au travers de laquelle se fait la recharge.

Quant aux questions de la variabilité climatique, elles représentent un potentiel majeur qui impacte tous les pays. Celle-ci s'exprime donc par une augmentation ou une diminution de la température moyenne, fluctuation des échanges atmosphériques et au sein du cycle de l'eau. Elle devient de plus en plus préoccupante au sein de la société car ses conséquences sont difficiles à supporter dans beaucoup de pays ; l'inondation, la sécheresse, fonte des glaciers et montée du niveau des océans et d'autres événements représentent les conséquences qui en découlent de cette dernière (GIEC, 2007). Il a été montré que la variabilité climatique est le plus

important facteur de l'évolution du taux de recharge des aquifères et les précipitations (Totin, 2015).

Depuis plus d'un siècle, une hausse des températures liée au changement climatique, et donc de l'évaporation, a pu être observée. L'évolution des précipitations, quant à elle, ne montre pas de tendance généralisée sur le territoire mais plutôt une évolution hétérogène. Plusieurs auteurs après avoir réalisé des simulations afin d'étudier les impacts de ces changements climatiques sur la ressource souterraine ont montré que cette hausse aura pour conséquence l'augmentation de l'assèchement des sols. Or des sols plus secs, qui limitent l'infiltration des eaux, entraînent une diminution de la recharge de la nappe par les précipitations car, en saison pluvieuse, le niveau monte mais en saison sèche le niveau diminue.

### - **Impact sur la ressource en eau souterraine**

D'après les études menées, les changements climatiques auront des répercussions directes sur les ressources en eau souterraine, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. La recharge en eau des nappes souterraines, et plus particulièrement des nappes libres, se fait grâce à l'infiltration de l'eau de pluie. Cette recharge dépend donc des précipitations. Les différentes études menées sur les changements climatiques montrent, en règle générale, une diminution des précipitations, notamment pour la période estivale. A cela s'ajouterait une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui diminuerait encore l'eau réellement infiltrée. Ainsi la diminution du flux entrant dans le système changerait les conditions de recharge des systèmes hydrogéologiques.

En ce qui concerne les flux sortants, il existe une étroite relation entre les cours d'eau et les aquifères souterrains. Généralement, les cours d'eau alimentent les nappes en période de pluies et sont alimentés par ces dernières en saison sèche. Ainsi, en période de la pluie ou de hautes eaux, ce sont les cours d'eau qui alimentent les nappes. Ainsi, une baisse des débits des cours d'eau engendrerait une plus faible recharge des eaux souterraines en saison sèche.

L'intensité des pluies et le volume d'eau pluviale jouent un rôle important dans la recharge des aquifères. L'importance des fortes pluies dans la recharge des eaux souterraines a été montrée en Afrique subsaharienne (Eilers *et al.*, 2007 ; Mileham *et al.*, 2009 ; Owor *et al.*, 2009 ; Taylor *et al.*, 2012). De plus, Boukari (1998), Alassane (2002), Totin *et al.* (2009), Totin (2010) ont montré la sensibilité du système aquifère à la variation du climat dans le bassin hydrogéologique côtier du Bénin.

## 4-5 Discussion des résultats

La présente étude vise à comprendre la manière dont la recharge évolue suivant la profondeur du toit de la nappe de l'aquifère du Mio-Pliocène sur le plateau d'Allada. Des signaux piézométriques ont été simulés à l'aide du logiciel Feflow et ceci a permis de comprendre qu'au fur et à mesure que l'on évolue en profondeur le signal piézométrique s'atténue indépendamment de la durée de la recharge. Ces résultats corroborent avec ceux de Ndiaga Sow (2005). Selon ce dernier, la recharge diminue avec la profondeur car elle peut avoir une influence considérable sur le mécanisme de propagation des eaux de pluie dans le sous-sol (Degallier, 1967 in Ndiaga Sow (2005)).

En parallèle, les travaux de Houenoussi (2020) sur l'Etude de la recharge naturelle de la ressource en eau souterraine sur le plateau d'Allada (Bénin) stipule que la quantité d'eau précipitée sur le plateau est en moyenne de 1127,53 mm/an dans la période de 2010 à 2015. L'ETR, qui représente la part de précipitations qui retourne dans l'atmosphère est de 1089,25mm/an soit 96 % des précipitations évaporées. L'excédent d'eau disponible pour assurer le ruissellement et l'infiltration est de 38,29 mm. Ainsi, son estimation de la recharge par la méthode du bilan de Thornthwaite lui a donné une valeur moyenne de 34,46 mm/an ce qui est carrément différent de la recharge que nous avons utilisée. En somme, elle n'a pas observé de zone de recharge sur le plateau où l'écoulement se fait de façon gravitaire du Nord vers le Sud. En termes de piézométrie, le niveau du toit de la nappe augmente de manière continue indiquant une recharge en continue qui serait due non seulement à la pluviométrie, mais aussi aux apports indirects. En ce qui concerne les forages, l'analyse statistique a révélé que les débits d'exploitations des forages varient entre 0,275 et 134 m<sup>3</sup>/h avec un niveau statique moyen de 37,63 m. Ibrahim (2008) dans ses travaux de recherche, a utilisé la méthodologie de l'application de la thermique pour mieux connaître la dynamique de recharge de la nappe phréatique par les eaux de surface suivant le logiciel Feflow. D'après ses travaux, Ibrahim a retenu que les paramètres hydrodynamiques calés lors de la modélisation et simulés en régime transitoire, à savoir une perméabilité de  $5.10^{-4}$  m/s et une porosité de 10%, permettent de mieux représenter les gradients thermiques observés sur la zone d'étude. Cependant les gradients thermiques simulés présentent à long terme un décalage dans le temps par rapport à ceux observés sur le terrain. La raison avancée pour expliquer cela est une augmentation de l'eau dans la mare proche due au déboisement qui affecte la zone depuis une trentaine d'années et augmente l'intensité du ruissellement.

Ali Houmadi Mouhouyoudine (2019) dans ses travaux d'Analyse piézométrique et modélisation des signaux hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères du socle en région soudano-sahélienne (cas de Ouagadougou), au Burkina Faso, a montré que la recharge par les pluies est soumise à des variations très importantes à l'échelle d'une région ou de tout le pays. Elle varie aussi considérablement d'une année à l'autre sous l'influence de fluctuations climatiques. (IWACO, 1990, Filippi *et al.* 2009).

Si l'on pompe dans une zone de faille, ce qui correspond au cas d'un forage productif, on constate que le signal gravimétrique est d'autant plus important que le niveau statique est élevé. Ceci est dû au fait que les anomalies de masses sont alors plus proches du gravimètre. Par contre le rabattement dans les altérites est presque indépendant du niveau statique.

## **DIFFICULTES RENCONTREES**

Notons toutefois que lors de la réalisation de cette étude, nous avons rencontrés quelques difficultés dont la principale est l'absence de littérature pour le calage et la validation du modèle Feflow dans notre milieu d'étude. A cela s'ajoute le fait que l'atténuation du signal piézométrique complique l'estimation de la recharge par la méthode de la fluctuation des nappes.

## CONCLUSION ET SUGGESTIONS

Compte tenu de l'urbanisation croissante en Afrique, les ressources en eau des villes sont soumises à de fortes pressions. L'objectif de cette recherche a été d'analyser des signaux piézométriques annuels de recharge dans un contexte de changement climatique afin de faire ressortir l'influence de la recharge sur le niveau de la nappe.

Les paramètres hydrodynamiques utilisés sont issus des travaux de recherche du projet AGIRES OMIDELTA. Cette étude a été faite grâce au logiciel de modélisation hydrogéologique feflow version 6.2 ce qui a permis de simuler les signaux piézométriques tout en générant une recharge de 0.00498713 mm. Les diverses simulations ont été effectuées sur 10 ans et sur huit (08) différents slices.

Nous venons donc à la conclusion que le signal piézométrique annuel se dégrade en fonction de la profondeur au niveau de l'aquifère du Mio-Pliocène sur le plateau d'Allada.

En définitive, cette étude pourrait être approfondie avec la mise à disposition de données suffisantes et de bonne qualité. A cet effet, il est dégagé comme perspectives de :

- Utiliser dans la mesure du possible des données pluviométriques et piézométriques plus récentes pour avoir une meilleure estimation de la recharge qui refléterait plus exactement la situation actuelle des nappes.
- Estimer des paramètres hydrodynamiques des différents horizons, en particulier de la conductivité hydraulique à saturation

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Alle I. C. (2022)** ; Présentation des grands ensembles aquifères du Bénin ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 72p.

**Amoussou E., (2010)** ; Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 313p.

**Bichot, F. J. Lavie, D. Dequidt (2010)** ; Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe ; version définitive projets de services publics du BRGM 2012 ; 318p.

**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 de doctorat à l'université CHEIKH ANTA DIOP de Dakar ; 344p.

**Carriere S. (2009-2010)** ; modélisation hydrologique à grande échelle choix conceptuels et calibration : exemple du bassin de Dyle (Belgique) ; Rapport de stage Master 2 ; 57p.

**Chokpon A. E (2012)** ; Résultats préliminaires de modélisation hydrodynamiques de la nappe phréatique du site d'enfouissement sanitaire de ouèssè (Commune de Ouidah) ; Master professionnel en hydrologie à l'INE ; 113p.

**Dossou R. (2016)** ; fluctuation du niveau de l'eau souterraine sur le champ de captage de Ouèdo suite aux pompages de la SONEB ; Licence professionnelle en hydrologie à l'INE ;65p.

**Favreau G. (1996)** ; Modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de WANKAMA (sud-ouest du Niger) ; mémoire de Diplôme d'Etude Approfondie ; 93p.

**Fink A. (2007)** ; Scénarios et observations climatiques en Afrique Occidentale et au Bénin. Projet Impétus. 56p.

**Gato, S., Jayasuriya, N. et Roberts, P., (2007)**; « Temperature and rainfall thresholds for base use urban water demand modelling ». Journal of Hydrology, Vol. 337, n° 3 et 4, pp. 364–376. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.014.

**Gbeyetin F. J.G. (2011)** ; structure diamétrique et caractérisation de l'habitat de *Chrysophyllum albidum* sur le plateau d'Allada au Bénin ; mémoire de Maîtrise à la FLASH.

**GIEC, (2007)**. Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique : résumé à l'intention des décideurs, Rapport des Groupes de travail I et II. 32 p.

**GIEC, (2014)** Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge/New York, Royaume-Uni/USA, Cambridge University Press.

**Gnimadi G.C. (2014)** ; la phagocytose urbaine : le phénomène et ses implications sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin ; recherche de l'INRAB ; 12p.

**Hachaichi Z. (2018)** ; Quantification de la recharge naturelle et artificielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone semi -aride (bassin de Foussana) Tunisie centrale ; Thèse de DOCTORAT dans la discipline Génie Géologique à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax ; 262 p.

**Houenoussi A. (2020)** ; Etude de la recharge naturelle de la ressource en eau souterraine cas du plateau d'Allada (Bénin) ; mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2iE avec grade de Master ; 60p.

**Houmadi M. A. (2015)** ; Analyse piézométrique et modélisation des signaux hydrologiques et gravimétriques dans les aquifères du socle en région soudano-sahélienne : cas de Ouagadougou ; thèse de doctorat à l'Université de MONTPELLIER ; 213p.

**Houngbedji B. A. (2016)** ; comportement hydrodynamiques des nappes superficielles de la commune d'Abomey-calavi ; Master professionnel en hydrologie appliquée à l'INE ;97p.

**Ibrahim M. (2008)** ; Modélisation des flux thermiques eaux de surface- eaux souterraines : application aux mares endoréiques du Sud-Ouest du Niger ; Master BGAE 2<sup>ème</sup> année Recherche Eau et Environnement (R2E) université MONTPELLIER II ; 56p.

**Kotchoni V. O. (2012)** ; Evaluation des performances des forages d'exploitation du champ de captage de Ouèdo et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère capté : intérêt pour une mise en valeur durable des ressources en eau souterraine locales ; mémoire de Master en hydrologie à la FAST ; 164p.

**Lalot É. (2014)** ; Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières application au Rhône, thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 371 p.

**Matakara G. (2015)** ; Variation piézométrique dans le champ de captage de Godomey et ses environs, période 1991-2015 ; Master professionnel en hydrologie à l'INE ; 55 p.

**Nangbe F. (2006)** ; Monographie de la Commune de Allada ; Afrique conseil ; 37p.

**OLLIVAUD N. (2012)** ; Valorisation des données piézométriques des réseaux sous maîtrise d'ouvrage DEAL et BRGM ; Rapport final projets de services public du BRGM 2012 ; 154p.

**Orban P., brouyère S. (2022)** ; bases fondamentales d'hydrogéologie ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 47p.

**Orban P., brouyère S. (2022)** ; bilan en eau et piézométrie ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 48 p.

**Orban P., brouyère S. (2022)** ; caractérisation des interactions rivière-nappe : bilan et indicateurs dérivés ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 18p.

**Orban P., brouyère S. (2022)** ; essais de pompage ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 36p.

**Orban P., brouyère S. (2022)** ; les cartes hydrogéologiques ; formation professionnelle dispensée à Cotonou dans le cadre du projet WBI ; 21p.

**Ounaïs S. (2012)** ; Modélisation du transfert hydrique dans l'aquifère alluvial du polder d'Erstein (Bas-Rhin) ; thèse de doctorat à l'université Strasbourg ; 209p.

**Sinabarigui I. (2020)** ; Diagnostique de mise en valeur des bas-fonds du bassin versant de l'Okpara et modélisation du fonctionnement hydrologique dudit bassin à l'exutoire de Kaboua ; Protocole de recherche Master Régional Ressources en Eau et Risques Environnementaux dans les Métropoles Africaines (MAREMA) à l'INE ; 12p.

**Sircoulon J., (1974), Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'Ouest sahélienne-SIES RAPPORT n° 2, 44 p.**

**Sow N. (2004 – 2005)** ; Modélisation des écoulements en milieu poreux non saturé : Application à la recharge naturelle des nappes ; En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception ; 115p.

**Ticoutchika B. E. I (2021)** ; Etude de la productivité et détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères de socles des communes de Nikki, Pèrèrè et N 'dali ; mémoire de Licence professionnelle en hydrologie à l'INE ; 80p.

**Totin V.S.H. (2015)** ; Evènements pluvieux et sensibilité des aquifères libres dans le champ de captage de Godomey au Bénin ; XXVIIIe Colloque de l'association internationale de climatologie ; 7p.

**Varni M. (2013)**; Application of the water table fluctuation method to characterize ground water recharge in the pampa plain, Argentina; Hydrological sciences journal; 12p.

# **ANNEXES**

Annexe 1 : Paramètres hydrodynamiques de quelques sols selon RETC

Type de Sol	Ksat (cm/jour)	Sr	Ssat	<b>a</b>	n	<b>1</b>
Sable	712.8	0.045	0.43	0.145	2.68	0.5
Sable riche en terreau	350	0.057	0.41	0.124	2.28	0.5
Terreau Sableux	106.1	0.065	0.41	0.075	1.89	0.5
Terreau	24.96	0.078	0.43	0.036	1.56	0.5
Latérite	6	0.034	0.46	0.016	1.37	0.5
Terreau Silteux	10.8	0.067	0.45	0.02	1.41	0.5
Sable argileux	31.44	0.1	0.39	0.059	1.48	0.5
Terreau Argileux	6.24	0.095	0.41	0.019	1.31	0.5
Argilo Silteux	1.68	0.089	0.43	0.01	1.23	0.5
Argile Sableuse	2.88	0.1	0.38	0.027	1.23	0.5
Argile Silteux	0.48	0.07	0.36	0.005	1.09	0.5
Argile	4.8	0.068	0.38	0.008	1.09	

Annexe 2 : Chronique de recharge sur 10ans

Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge
0	0.00095249	791	0.00040998	1582	0.0004012	2373	0.00012949
30	0.00095249	822	0.00016483	1613	0.00045111	2404	3.58E-05
61	4.10E-04	852	0.0004012	1643	0.00012949	2435	5.40E-05
92	0.00016483	883	0.00045111	1674	3.58E-05	2463	0.00010464
122	0.0004012	913	0.00012949	1705	5.40E-05	2494	0.00021958
153	4.51E-04	944	3.58E-05	1733	0.00010464	2525	0.00044052
183	1.29E-04	975	5.40E-05	1764	0.00021958	2555	0.00067158
214	3.58E-05	1003	0.00010464	1794	0.00044052	2585	0.00095249
245	5.40E-05	1034	0.00021958	1825	0.00067158	2616	0.00040998
273	0.00010464	1064	0.00044052	1855	0.00095249	2647	0.00016483
304	0.00021958	1095	0.00067158	1886	0.00040998	2677	0.0004012
334	0.00044052	1125	0.00095249	1917	0.00016483	2708	0.00045111
365	0.00067158	1156	0.00040998	1947	0.0004012	2738	0.00012949
395	0.00095249	1187	0.00016483	1978	0.00045111	2769	3.58E-05
426	0.00040998	1217	0.0004012	2008	0.00012949	2800	5.40E-05
457	0.00016483	1248	0.00045111	2039	3.58E-05	2828	0.00010464
487	0.0004012	1278	0.00012949	2070	5.40E-05	2859	0.00021958
518	0.00045111	1309	3.58E-05	2098	0.00010464	2889	0.00044052
548	0.00012949	1340	5.40E-05	2129	0.00021958	2920	0.00067158
579	3.58E-05	1368	0.00010464	2159	0.00044052	2950	0.00095249
610	5.40E-05	1399	0.00021958	2190	0.00067158	2981	0.00040998
638	0.00010464	1429	0.00044052	2220	0.00095249	3012	0.00016483
669	0.00021958	1460	0.00067158	2251	0.00040998	3042	0.0004012
699	0.00044052	1490	0.00095249	2282	0.00016483	3073	0.00045111
730	0.00067158	1521	0.00040998	2312	0.0004012	3103	0.00012949
760	0.00095249	1552	0.00016483	2343	0.00045111	3134	3.58E-05
3165	5.40E-05	3285	0.00067158	3407	0.0004012	3530	5.40E-05
3193	0.00010464	3315	0.00095249	3438	0.00045111	3558	0.00010464
3224	0.00021958	3346	0.00040998	3468	0.00012949	3589	0.00021958
3254	0.00044052	3377	0.00016483	3499	3.58E-05	3619	0.00044052
						3650	0.00067158

Annexe 3 : Chronique de recharge sur 20ans

Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge
0	0.00095249	1187	0.00016483	2373	0.00012949	3558	0.00010464
30	0.00095249	1217	0.0004012	2404	3.58E-05	3589	0.00021958
61	4.10E-04	1248	0.00045111	2435	5.40E-05	3619	0.00044052
92	0.00016483	1278	0.00012949	2463	0.00010464	3650	0.00067158
122	0.0004012	1309	3.58E-05	2494	0.00021958	3680	0.00095249
153	4.51E-04	1340	5.40E-05	2525	0.00044052	3711	0.00040998
183	1.29E-04	1368	0.00010464	2555	0.00067158	3742	0.00016483
214	3.58E-05	1399	0.00021958	2585	0.00095249	3772	0.0004012
245	5.40E-05	1429	0.00044052	2616	0.00040998	3803	0.00045111
273	0.00010464	1460	0.00067158	2647	0.00016483	3833	0.00012949
304	0.00021958	1490	0.00095249	2677	0.0004012	3864	3.58E-05
334	0.00044052	1521	0.00040998	2708	0.00045111	3895	5.40E-05
365	0.00067158	1552	0.00016483	2738	0.00012949	3923	0.00010464
395	0.00095249	1582	0.0004012	2769	3.58E-05	3954	0.00021958
426	0.00040998	1613	0.00045111	2800	5.40E-05	3984	0.00044052
457	0.00016483	1643	0.00012949	2828	0.00010464	4015	0.00067158
487	0.0004012	1674	3.58E-05	2859	0.00021958	4045	0.00095249
518	0.00045111	1705	5.40E-05	2889	0.00044052	4076	0.00040998
548	0.00012949	1733	0.00010464	2920	0.00067158	4107	0.00016483
579	3.58E-05	1764	0.00021958	2950	0.00095249	4137	0.0004012
610	5.40E-05	1794	0.00044052	2981	0.00040998	4168	0.00045111
638	0.00010464	1825	0.00067158	3012	0.00016483	4198	0.00012949
669	0.00021958	1855	0.00095249	3042	0.0004012	4229	3.58E-05
699	0.00044052	1886	0.00040998	3073	0.00045111	4260	5.40E-05
730	0.00067158	1917	0.00016483	3103	0.00012949	4288	0.00010464
760	0.00095249	1947	0.0004012	3134	3.58E-05	4319	0.00021958
791	0.00040998	1978	0.00045111	3165	5.40E-05	4349	0.00044052
822	0.00016483	2008	0.00012949	3193	0.00010464	4380	0.00067158
852	0.0004012	2039	3.58E-05	3224	0.00021958	4410	0.00095249

883	0.00045111	2070	5.40E-05	3254	0.00044052	4441	0.00040998
913	0.00012949	2098	0.00010464	3285	0.00067158	4472	0.00016483
944	3.58E-05	2129	0.00021958	3315	0.00095249	4502	0.0004012
975	5.40E-05	2159	0.00044052	3346	0.00040998	4533	0.00045111
1003	0.00010464	2190	0.00067158	3377	0.00016483	4563	0.00012949
1034	0.00021958	2220	0.00095249	3407	0.0004012	4625	3.58E-05
1064	0.00044052	2251	0.00040998	3438	0.00045111	4653	5.40E-05
1095	0.00067158	2282	0.00016483	3468	0.00012949	4684	0.00010464
1125	0.00095249	2312	0.0004012	3499	3.58E-05	4714	0.00021958
1156	0.00040998	2343	0.00045111	3530	5.40E-05	4745	0.00044052
4806	0.00040998	5414	0.00021958	6023	0.00012949	6815	5.40E-05
4837	0.00016483	5444	0.00044052	6054	3.58E-05	6843	0.00010464
4867	0.0004012	5475	0.00067158	6085	5.40E-05	6874	0.00021958
4898	0.00045111	5505	0.00095249	6113	0.00010464	6904	0.00044052
4928	0.00012949	5536	0.00040998	6144	0.00021958	6935	0.00067158
4959	3.58E-05	5567	0.00016483	6174	0.00044052	6965	0.00095249
4990	5.40E-05	5597	0.0004012	6205	0.00067158	6996	0.00040998
5018	0.00010464	5628	0.00045111	6235	0.00095249	7027	0.00016483
5049	0.00021958	5658	0.00012949	6266	0.00040998	7057	0.0004012
5079	0.00044052	5689	3.58E-05	6297	0.00016483	7088	0.00045111
5110	0.00067158	5720	5.40E-05	6327	0.0004012	7118	0.00012949
5140	0.00095249	5748	0.00010464	6358	0.00045111	7149	3.58E-05
5171	0.00040998	5779	0.00021958	6388	0.00012949	7180	5.40E-05
5202	0.00016483	5809	0.00044052	6419	3.58E-05	7208	0.00010464
5232	0.0004012	5840	0.00067158	6450	5.40E-05	7239	0.00021958
5263	0.00045111	5870	0.00095249	6478	0.00010464	7269	0.00044052
5293	0.00012949	5901	0.00040998	6509	0.00021958	7300	0.00067158
5324	3.58E-05	5932	0.00016483	6539	0.00044052		
5355	5.40E-05	5962	0.0004012	6753	0.00012949		
5383	0.00010464	5993	0.00045111	6784	3.58E-05		

Annexe 4 : Chronique de recharge sur 30ans

Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge	Jours	Recharge
0	0.00095249	1187	0.00016483	2373	0.00012949	3558	0.00010464
30	0.00095249	1217	0.0004012	2404	3.58E-05	3589	0.00021958
61	4.10E-04	1248	0.00045111	2435	5.40E-05	3619	0.00044052
92	0.00016483	1278	0.00012949	2463	0.00010464	3650	0.00067158
122	0.0004012	1309	3.58E-05	2494	0.00021958	3680	0.00095249
153	4.51E-04	1340	5.40E-05	2525	0.00044052	3711	0.00040998
183	1.29E-04	1368	0.00010464	2555	0.00067158	3742	0.00016483
214	3.58E-05	1399	0.00021958	2585	0.00095249	3772	0.0004012
245	5.40E-05	1429	0.00044052	2616	0.00040998	3803	0.00045111
273	0.00010464	1460	0.00067158	2647	0.00016483	3833	0.00012949
304	0.00021958	1490	0.00095249	2677	0.0004012	3864	3.58E-05
334	0.00044052	1521	0.00040998	2708	0.00045111	3895	5.40E-05
365	0.00067158	1552	0.00016483	2738	0.00012949	3923	0.00010464
395	0.00095249	1582	0.0004012	2769	3.58E-05	3954	0.00021958
426	0.00040998	1613	0.00045111	2800	5.40E-05	3984	0.00044052
457	0.00016483	1643	0.00012949	2828	0.00010464	4015	0.00067158
487	0.0004012	1674	3.58E-05	2859	0.00021958	4045	0.00095249
518	0.00045111	1705	5.40E-05	2889	0.00044052	4076	0.00040998
548	0.00012949	1733	0.00010464	2920	0.00067158	4107	0.00016483
579	3.58E-05	1764	0.00021958	2950	0.00095249	4137	0.0004012
610	5.40E-05	1794	0.00044052	2981	0.00040998	4168	0.00045111
638	0.00010464	1825	0.00067158	3012	0.00016483	4198	0.00012949
669	0.00021958	1855	0.00095249	3042	0.0004012	4229	3.58E-05
699	0.00044052	1886	0.00040998	3073	0.00045111	4260	5.40E-05
730	0.00067158	1917	0.00016483	3103	0.00012949	4288	0.00010464
760	0.00095249	1947	0.0004012	3134	3.58E-05	4319	0.00021958
791	0.00040998	1978	0.00045111	3165	5.40E-05	4349	0.00044052
822	0.00016483	2008	0.00012949	3193	0.00010464	4380	0.00067158
852	0.0004012	2039	3.58E-05	3224	0.00021958	4410	0.00095249

883	0.00045111	2070	5.40E-05	3254	0.00044052	4441	0.00040998
913	0.00012949	2098	0.00010464	3285	0.00067158	4472	0.00016483
944	3.58E-05	2129	0.00021958	3315	0.00095249	4502	0.0004012
975	5.40E-05	2159	0.00044052	3346	0.00040998	4533	0.00045111
1003	0.00010464	2190	0.00067158	3377	0.00016483	4563	0.00012949
1034	0.00021958	2220	0.00095249	3407	0.0004012	4625	3.58E-05
1064	0.00044052	2251	0.00040998	3438	0.00045111	4653	5.40E-05
1095	0.00067158	2282	0.00016483	3468	0.00012949	4684	0.00010464
1125	0.00095249	2312	0.0004012	3499	3.58E-05	4714	0.00021958
1156	0.00040998	2343	0.00045111	3530	5.40E-05	4745	0.00044052
4806	0.00040998	6144	0.00021958	7483	0.00012949	8821	0.00040998
4837	0.00016483	6174	0.00044052	7514	3.58E-05	8852	0.00016483
4867	0.0004012	6205	0.00067158	7545	5.40E-05	8882	0.0004012
4898	0.00045111	6235	0.00095249	7573	0.00010464	8913	0.00045111
4928	0.00012949	6266	0.00040998	7604	0.00021958	8943	0.00012949
4959	3.58E-05	6297	0.00016483	7634	0.00044052	8974	3.58E-05
4990	5.40E-05	6327	0.0004012	7665	0.00067158	9005	5.40E-05
5018	0.00010464	6358	0.00045111	7695	0.00095249	9033	0.00010464
5049	0.00021958	6388	0.00012949	7726	0.00040998	9064	0.00021958
5079	0.00044052	6419	3.58E-05	7757	0.00016483	9094	0.00044052
5110	0.00067158	6450	5.40E-05	7787	0.0004012	9125	0.00067158
5140	0.00095249	6478	0.00010464	7818	0.00045111	9155	0.00095249
5171	0.00040998	6509	0.00021958	7848	0.00012949	9186	0.00040998
5202	0.00016483	6539	0.00044052	7879	3.58E-05	9217	0.00016483
5232	0.0004012	6570	0.00067158	7910	5.40E-05	9247	0.0004012
5263	0.00045111	6600	0.00095249	7938	0.00010464	9278	0.00045111
5293	0.00012949	6631	0.00040998	7969	0.00021958	9308	0.00012949
5324	3.58E-05	6662	0.00016483	7999	0.00044052	9339	3.58E-05
5355	5.40E-05	6692	0.0004012	8030	0.00067158	9370	5.40E-05
5383	0.00010464	6723	0.00045111	8060	0.00095249	9398	0.00010464
5414	0.00021958	6753	0.00012949	8091	0.00040998	9429	0.00021958
5444	0.00044052	6784	3.58E-05	8122	0.00016483	9459	0.00044052

5475	0.00067158	6815	5.40E-05	8152	0.0004012	9490	0.00067158
5505	0.00095249	6843	0.00010464	8183	0.00045111	9520	0.00095249
5536	0.00040998	6874	0.00021958	8213	0.00012949	9551	0.00040998
5567	0.00016483	6904	0.00044052	8244	3.58E-05	9582	0.00016483
5597	0.0004012	6935	0.00067158	8275	5.40E-05	9612	0.0004012
5628	0.00045111	6965	0.00095249	8303	0.00010464	9643	0.00045111
5658	0.00012949	6996	0.00040998	8334	0.00021958	9673	0.00012949
5689	3.58E-05	7027	0.00016483	8364	0.00044052	9704	3.58E-05
5720	5.40E-05	7057	0.0004012	8395	0.00067158	9735	5.40E-05
5748	0.00010464	7088	0.00045111	8425	0.00095249	9763	0.00010464
5779	0.00021958	7118	0.00012949	8456	0.00040998	9794	0.00021958
5809	0.00044052	7149	3.58E-05	8487	0.00016483	9824	0.00044052
5840	0.00067158	7180	5.40E-05	8517	0.0004012	9855	0.00067158
5870	0.00095249	7208	0.00010464	8548	0.00045111	9885	0.00095249
5901	0.00040998	7239	0.00021958	8578	0.00012949	9916	0.00040998
5932	0.00016483	7269	0.00044052	8609	3.58E-05	9947	0.00016483
5962	0.0004012	7300	0.00067158	8640	5.40E-05	9977	0.0004012
5993	0.00045111	7330	0.00095249	8668	0.00010464	10008	0.00045111
6023	0.00012949	7361	0.00040998	8699	0.00021958	10038	0.00012949
6054	3.58E-05	7392	0.00016483	8729	0.00044052	10069	3.58E-05
6085	5.40E-05	7422	0.0004012	8760	0.00067158	10100	5.40E-05
6113	0.00010464	7453	0.00045111	8790	0.00095249	10128	0.00010464
10159	0.00021958	10342	0.0004012	10524	0.00021958	10707	0.0004012
10189	0.00044052	10373	0.00045111	10554	0.00044052	10738	0.00045111
10220	0.00067158	10403	0.00012949	10585	0.00067158	10768	0.00012949
10250	0.00095249	10434	3.58E-05	10615	0.00095249	10799	3.58E-05
10281	0.00040998	10465	5.40E-05	10646	0.00040998	10830	5.40E-05
10312	0.00016483	10493	0.00010464	10677	0.00016483		

## TABLE DES MATIERES

CERTIFICATION.....	ii
REMERCIEMENTS .....	iv
LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS.....	vi
SOMMAIRE .....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ANNEXES.....	viii
RESUME.....	ix
ABSTRACT .....	x
INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE .....	4
1-1 Clarification de quelques concepts .....	5
1-2- Hydrogéologie du plateau d’Allada .....	10
Chapitre 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	13
2-1- Situation géographique .....	14
2-2- Milieu humain.....	16
2-3- Relief.....	16
2-4- Contexte hydroclimatique.....	16
2-5- Contexte pédologique .....	17
2-6 – Végétation .....	17
2-7- Cadre géologique du bassin sédimentaire côtier du plateau d’Allada .....	18
Chapitre 3 : APPROCHE METHODOLOGIQUE .....	19
3-1- Matériel.....	20
3-2-1- Modélisation Hydrogéologique .....	20
3-2-2- Processus de modélisation sur feflow .....	21
- Paramètres hydrodynamiques .....	25
Chapitre 4 : RESULTATS ET DISCUSSION .....	29

4-1- Estimation de la recharge.....	30
4-2 Présentation et interprétation des résultats de la simulation sur 10 ans. ....	32
4-3 Influence de la recharge sur le niveau de la nappe.....	35
4-4 Impact du changement climatique sur le signal piézométrique .....	35
4-5 Discussion des résultats.....	37
ANNEXES .....	45
TABLE DES MATIERES .....	53