



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0358/2021

N° CARTE D'ÉTUDIANT :

CI0413007498

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

Option : Hydrogéologie et Environnement

THÈME :

**Simulation numérique des écoulements souterrains
dans les aquifères fissurés du permis d'exploitation de
la mine d'or d'Angovia (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

KONE Tenon

JURY

Président : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le 01/03/2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0358/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0413007498

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement
Option Hydrogéologie et Environnement

Thème

**Simulation numérique des écoulements souterrains dans
les aquifères fissurés du permis d'exploitation de la mine
d'or d'ANGOVIA (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

KONE Tenon

JURY

Président : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le 01/03/2021

DÉDICACE

*Je dédie ce travail à ma mère feu **DIABATÉ Bêry**, décédée le 24 Avril 2020 ; en reconnaissance des efforts consentis et à l'amour dont elle a longtemps fait preuve pour que j'en arrive là ! Que ton âme repose en paix maman. Grâce à tes prières et bénédictions, ton rêve se réalisera.*

REMERCIEMENTS

Ce travail de mémoire de Master n'aurait pu avoir lieu sans l'appui d'un grand nombre de personnes qui, par leur aide morale, physique et financière, nous ont permis de le mener à bien. Recevez ici nos remerciements les plus sincères et ma profonde gratitude.

Nous tenons à remercier d'abord, tout le personnel enseignant de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (UJLoG) avec à sa tête **Mme TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE**, Professeur Titulaire et Présidente de ladite Université, pour tous les efforts consentis et pour son altruisme dans la formation et le bien être des étudiants.

Nos remerciements les plus sincères et les plus distingués vont à l'endroit du Directeur de l'UFR Environnement, **M. KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire, pour le travail abattu à la tête de l'UFR Environnement et à l'Université. Vous êtes une boussole pour nous Professeur, merci infiniment pour la formation.

Nous exprimons également notre chaleureuse reconnaissance à **M. DIBI Brou**, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), qui a accepté la direction de ce mémoire de Master en dépit de ces multiples occupations. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour votre disponibilité, votre engagement tout au long de ce travail de recherche. Vous nous avez communiqué votre passion pour l'hydrogéologie et nous a fait profiter de votre expérience. Merci pour tout !

Nous exprimons aussi notre gratitude à **M. ANOH Kouao Armand**, Maître-Assistant, qui a accepté l'encadrement de ce travail. Nous vous remercions Docteur pour votre disponibilité et vos critiques pertinentes. Merci infiniment pour votre inestimable soutien scientifique et moral, pour vos précieux conseils et pour votre sympathie. Vous nous avez beaucoup appris. Merci pour tout. Que vous prospériez à tous égards !

Toute notre reconnaissance et notre respect vont à l'endroit de **M. KOUADIO Zilé Alex**, Maître de Conférences et responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE). Merci pour vos conseils.

Une mention spéciale à **M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice**, Maître de Conférences pour avoir accepté de présider le jury et d'apporter son plus à ce travail.

De manière particulière, nous tenons à remercier **M. EBLIN Sampah Georges** et **M. SORO Tanina Drissa**, tous Maîtres-Assistants qui ont bien voulu apporter leurs expertises pour l'amélioration de ce document.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos aînés du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour leur soutien et encouragement, plus particulièrement, aux **Monsieurs KOUADIO Kouamé Jean Olivier; KOFFI Bérenger ;**

KOUASSI Kouassi Jean Michel ; OUATTARA Gningnéri Souleymane ; TOURE Fanraban Fabrice et à tous nos aimables amis de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE), nous leurs disons merci pour le soutien.

Nous remercions toute la famille **KONE en particulier**, à **M. KONE Nambégué et Madame** pour leur soutien.

Nous n'oublions pas non plus de dire merci à tous nos amis en particulier, **YEO Nonwa Seydou, AFFESSI Affessi Christian Serge Désiré, Camara Innocent, KONE Tayou, N'CHO Tchimou Bruce Arthure** et à tous ceux dont leurs noms ne figurent pas sur ce manuscrit.

TABLE DES MATIERES	Pages
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	4
1.1. Présentation de la zone d'étude	3
1.1.1. Situation géographique	3
1.1.2. Caractéristiques physiques	3
1.1.2.1. Climat	3
1.1.2.2. Relief	4
1.1.2.3. Végétation	4
1.1.2.4. Hydrographie.....	5
1.1.2.5. Sol.....	5
1.1.3. Contexte géologique et hydrogéologique	6
1.1.3.1. Géologie	6
1.1.3.2. Aperçu hydrogéologique	7
1.1.4. Aspect socio-économique de la région de la Marahoué	8
1.1.4.1. Populations	8
1.1.4.2. Activités économiques	8
1.2. Généralités sur la modélisation hydrogéologique.....	9
1.2.1. Définition d'un modèle hydrogéologique	9
1.2.2. Modèle conceptuel	9
1.2.3. Modèle numérique	9
1.2.4. Choix du logiciel.....	9
1.3. Impacts d'une activité minière sur la disponibilité de la ressource en eau souterraine.....	10
Conclusion partielle.....	10
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	5
2.1. Matériel.....	11
2.1.1. Données.....	11
2.1.1.1. Données climatologiques	11
2.1.1.2. Données d'essais de pompage et de piézométrie	11

2.1.2. Outils.....	11
2.1.2.1. Matériel de collecte de données	11
2.1.2.2. Outils de traitement de données	12
2.2. Méthodes.....	12
2.2.1. Estimation de la recharge.....	12
2.2.1.1. Bilan hydrologique	12
2.2.1.2. Estimation de l'infiltration	13
2.2.1.3. Etude piézométrique.....	15
2.2.2. Détermination des propriétés hydrauliques du système aquifère.....	16
2.2.2.1. Transmissivité	16
2.2.2.2. Perméabilités	17
2.2.2.3. Porosités	18
2.2.3. Méthodologie de réalisation du modèle numérique.....	18
2.2.3.1. Présentation du logiciel utilisé	19
2.2.3.3. Présentation de la carte des linéaments	22
2.2.3.4. Conditions aux limites du modèle.....	22
2.2.3.5. Simulation numérique	23
Conclusion partielle.....	25
TROISIEME PARTIE : RESULTAS ET DISCUSSION	26
3.1. Résultats	26
3.1.1. Estimation de la recharge.....	26
3.1.1.1. Bilan hydrologique	26
3.1.1.2. Etude piézométrique.....	26
3.1.2.1. Transmissivité	27
3.1.2.2. Perméabilités du système aquifère	28
3.1.2.3. Perméabilités de la couche d'altérite.....	28
3.1.2.4. Débits spécifiques	28
3.1.2.5. Porosité efficace et coefficient d'emmagasinement.....	29
3.1.2.6. Epaisseurs des couches.....	29
3.1.2. Maillage de la grille à différences finies	30
3.1.2.1. Les élévations du domaine modélisé.....	31
3.1.3. Simulation numérique	33
3.1.3.1. Calage du modèle en régime permanent	33

3.2. Discussion	36
Conclusion partielle	38
CONCLUSION	37
REFERENCES	45

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

DHH : Direction de l'Hydraulique Humaine

INPHB : Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny

LSTE : Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement

MINAGRI : Ministère de l'Agriculture

SIG : Système d'Information Géographique

SODEXAM : Société de Développement d'Exploitation d'Aéroportuaire, Aéronautique et
Météorologique

UFR : Unité de Formation et de Recherche

UJLoG : Université Jean Lorougnon Guédé

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I : Différentes classes de transmissivité de la zone d'Angovia.....	28
Tableau II : Perméabilités de la couche d'aquifère de la zone d'Angovia	28
Tableau III : Perméabilités de la couche d'altérite de la zone d'Angovia.....	28
Tableau IV : Débits spécifiques des forages	29
Tableau V : Epaisseurs des altérites (m)	30
Tableau VI : Epaisseurs du socle (m)	30
Tableau VII : Résultats des paramètres calés	33
Tableau VIII : Statistiques sur les écarts de calcul du calage.....	34

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.....	3
Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de la station de Zuénoula (1991-2020).....	4
Figure 3 : Réseau hydrographique d'Angovia	5
Figure 4 : Carte géologique de la zone d'Angovia (Konan, 2020)	7
Figure 5 : Matériel de collecte (A : GPS ; B : Infiltromètre ; C Tarière)	12
Figure 6 : Organigramme pour la conception du modèle hydrogéologique.....	19
Figure 7 : Carte des fractures	22
Figure 8 : Maillage du modèle	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Carte du toit en 3D issue d'une interpolation par krigeage	32
Figure 10 : Carte du mur en 3D issue d'une interpolation par krigeage	32
Figure 11 : Cartes piézométriques de basses eaux (a) et de hautes eaux (b) en 2015	27
Figure 12 : Corrélation entre les valeurs observée et simulée.....	34
Figure 13 : Cartes d'iso-valeurs des charges mesurées et des charges simulées	35

INTRODUCTION

Introduction

L'eau est une ressource vitale qui doit être gérée avec rigueur. Les eaux souterraines constituent approximativement les deux tiers des ressources mondiales en eau douce exploitable (Kouamé, 2007). En Afrique, il y'a une surexploitation de ces ressources en eau à cause de la démographie poussée, mais aussi, de certaines activités (agricoles, minières, industrielles, etc.). Toutefois, la gestion et la protection de cette importante ressource demeurent une préoccupation pour l'humanité et la Cote d'Ivoire en particulier. En effet, l'économie de la Côte d'Ivoire repose essentiellement sur l'agriculture qui est tributaire de l'eau. La conjugaison de l'anthropisation et du changement climatique a un impact négatif sur l'agriculture ivoirienne. Ainsi, depuis la chute des coûts des matières premières agricoles dans les années 1998 (Tano, 2012), le gouvernement ivoirien a voulu faire de l'industrie extractive le second pilier de son économie. C'est ainsi, qu'une ruée vers l'exploitation minière a été observée. Les richesses minières du sous-sol ivoirien ont attiré les populations allogènes et de la sous-région de l'Africaine de l'Ouest. Parallèlement à l'éclosion des activités minières, les ressources naturelles (forêt, sol et eau) ont subi une métamorphose (Koffi *et al.*, 2014). L'Etat dans son souci de règlementer cette activité et de préserver l'écosystème ivoirien a octroyé des permis à plusieurs compagnies. C'est le cas du permis d'exploitation minier d'Angovia. A Angovia, la population utilise pour la plupart les eaux souterraines pour la boisson. Malheureusement, malgré la modélisation des techniques d'extraction, l'eau souterraine constitue toujours une problématique à Angovia. En effet, l'eau souterraine est régulièrement pompée afin de dessécher les fosses d'exploitation. Or, ces pompages, en vue de maintenir les galeries et les fosses à sec afin d'extraire le minerai pourraient entraîner le rabattement de la nappe phréatique ainsi que le tarissement de certaines sources d'eau destinées à la consommation par les populations locales (Ferrand & Villeneuve, 2001). C'est dans ce contexte que cette étude dont le thème est « Simulation numérique des écoulements souterrains dans le permis d'exploitation de la mine d'or d'Angovia (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) » a été entreprise. L'objectif principal de cette étude est de comprendre le fonctionnement du système aquifère du permis d'exploitation minier d'Angovia.

Pour atteindre cet objectif, il s'agit de façon spécifique de :

- évaluer la recharge de la nappe du bassin versant de de la zone ;
- déterminer les paramètres hydrodynamiques du système aquifère du bassin versant de la zone ;
- élaborer un modèle de fonctionnement hydrodynamique.

Pour mener à bien cette étude, ce travail a été subdivisé en trois parties qui se présentent comme suit :

Introduction

- ❖ La première partie traite des généralités sur la zone d'étude. Elle fait donc une description des aspects géographique, hydrographique, hydrogéologique et géologique ;
- ❖ La deuxième partie est consacrée aux matériel et méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail ;
- ❖ La troisième partie analyse les principaux résultats obtenus suivis de leur discussion.

Une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus et des perspectives mettent fin à cette étude.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique

La zone aurifère d'Angovia est située dans le département de Bouaflé qui appartient à la région de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Elle est située entre 5°29' et 5°34' de longitudes Ouest et 6°59' et 7°4' de latitudes Nord (Figure 1). Le site minier d'Angovia est situé entre la ville de Bouaflé et celle de Yamoussoukro capitale politique de la Côte d'Ivoire et couvre une superficie de 52 km².

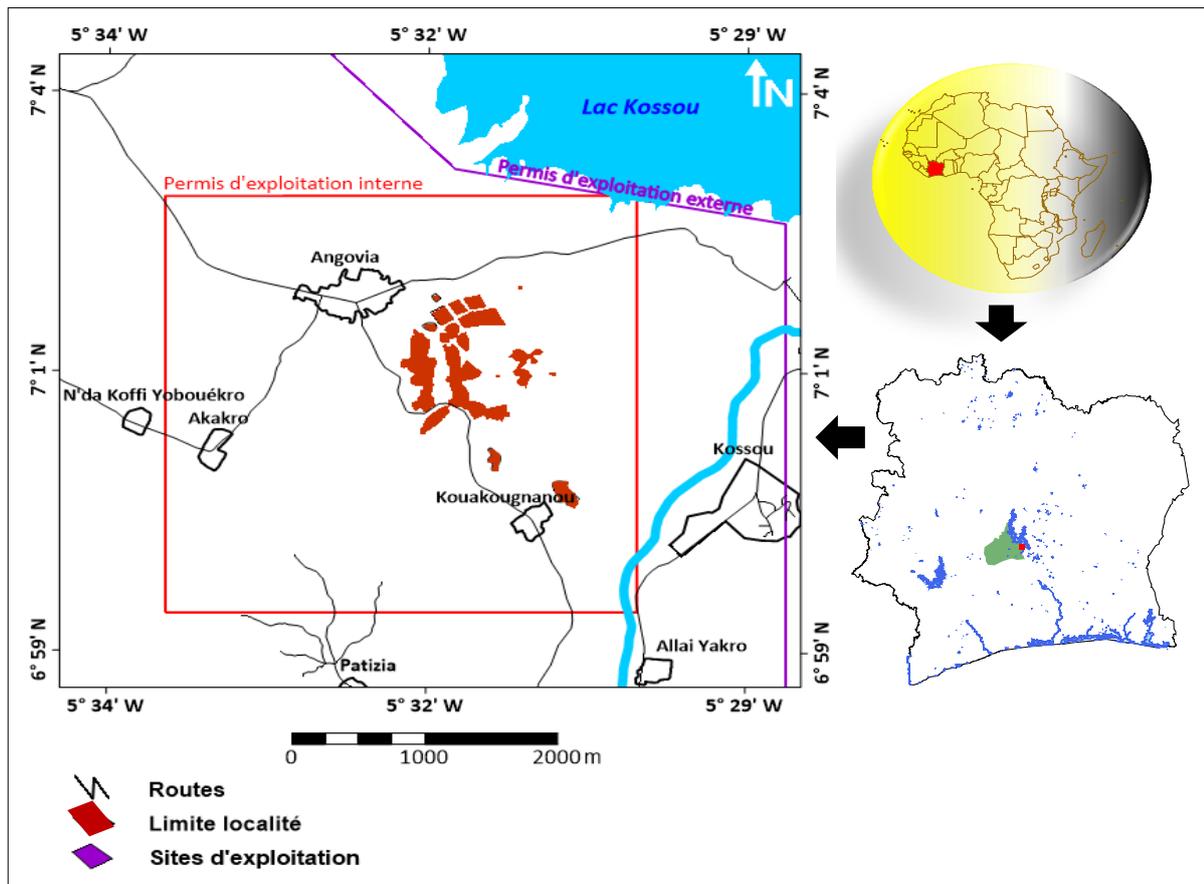


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.1.2. Caractéristiques physiques

1.1.2.1. Climat

Le climat de la région correspond au régime équatorial de transition atténué (climat Baouléen) caractérisé par deux saisons ; une saison des pluies d'Avril à Octobre et une saison sèche de Novembre à Mars (Figure 2).

La hauteur moyenne annuelle de pluie est estimée à 1200 mm. Les températures mensuelles oscillent entre 20,4 °C et 29,5 °C avec une moyenne de 25,5°C en Mars (Kouamé, 2007).

La région de la Marahoué est soumise à un climat tropical de transition avec une saison sèche et une saison pluvieuse. La saison sèche part de Novembre à Février et la saison des pluies débute en Mars et prend fin en Octobre. La pluviométrie moyenne de la région de la Marahoué enregistrée dans le complexe sucrier de Zuénoula sur la période 1996 à 2019 est de 772,8 mm. Le mois le plus sec est Janvier avec 4,3 mm et le mois le plus humide est celui de Juin avec une hauteur de pluie moyenne annuelle de 119,8 mm.

La température moyenne annuelle est de 33,1 °C. L'amplitude thermique est de 3,5 °C. Le mois le plus chaud de l'année est celui de Février avec une température moyenne de 36,4 °C. Le mois d'Août est le plus froid de l'année, la température moyenne est de 30,1 °C (Figure 2). La température varie entre 20,4 °C et 29,5 °C avec une moyenne de 25,5 °C en Mars (Kouamé., 2007).

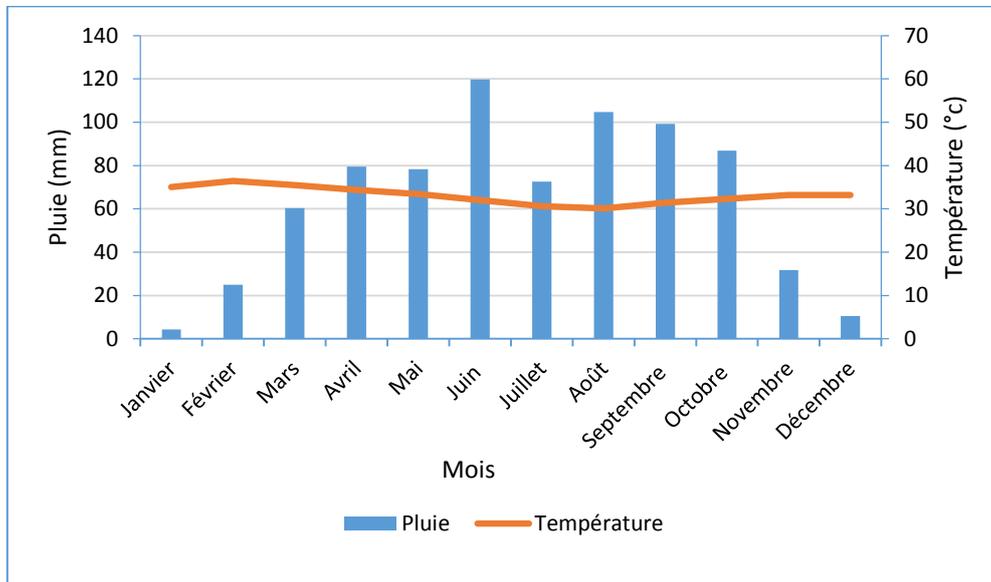


Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de la station de Zuénoula (1991-2020)

1.1.2.2. Relief

Le relief de la région d'Angovia est monotone dans l'ensemble dont l'altitude moyenne est 260 mètres. Yaouré culmine la région avec 600 mètres d'altitudes. Au niveau des formations géologiques, elle sont constituées par : Les roches métamorphiques schisteuses et les roches basiques du complexe volcano-sédimentaires responsables des massifs des collines du Centre et les roches granitiques (Avenard *et al.*, 1971).

1.1.2.3. Végétation

La zone étudiée est une zone de transition entre la forêt dense au Sud et la savane arborée au

Nord. Elle est couverte par une forêt semi dense, activement perturbée par les activités agricoles pratiquées surtout au bas et sur les flancs des collines, ainsi que par les activités de prospection et d'exploitation minière. On note toutefois la présence de forêt galerie, plus dense, aux abords des rives du Bandama blanc, des îlots forestiers au niveau des montagnes et des collines avec des végétaux tels que les *Caesalpinaceae*, des *Convolvulaceae*, des *Apocynaceae*, des *Poaceae* et des *Asteraceae* et caractérisée par un sous-bois touffu et influencé par la présence des plantes épineuses (Kouamé, 2007).

1.1.2.4. Hydrographie

La région de la Marahoué est drainée par de nombreux cours d'eau dont les plus importants sont les fleuves Bandama dont les affluents sont (les rivières Baha, Ouréné, Bôlè, Zabré, Bouré, Dromonyi) et le lac Kossou (Figure 3). Ainsi, la zone aurifère est arrosée par un réseau hydrographique dense constitué de cours d'eau permanents et temporaires (Kouamé, 2007).

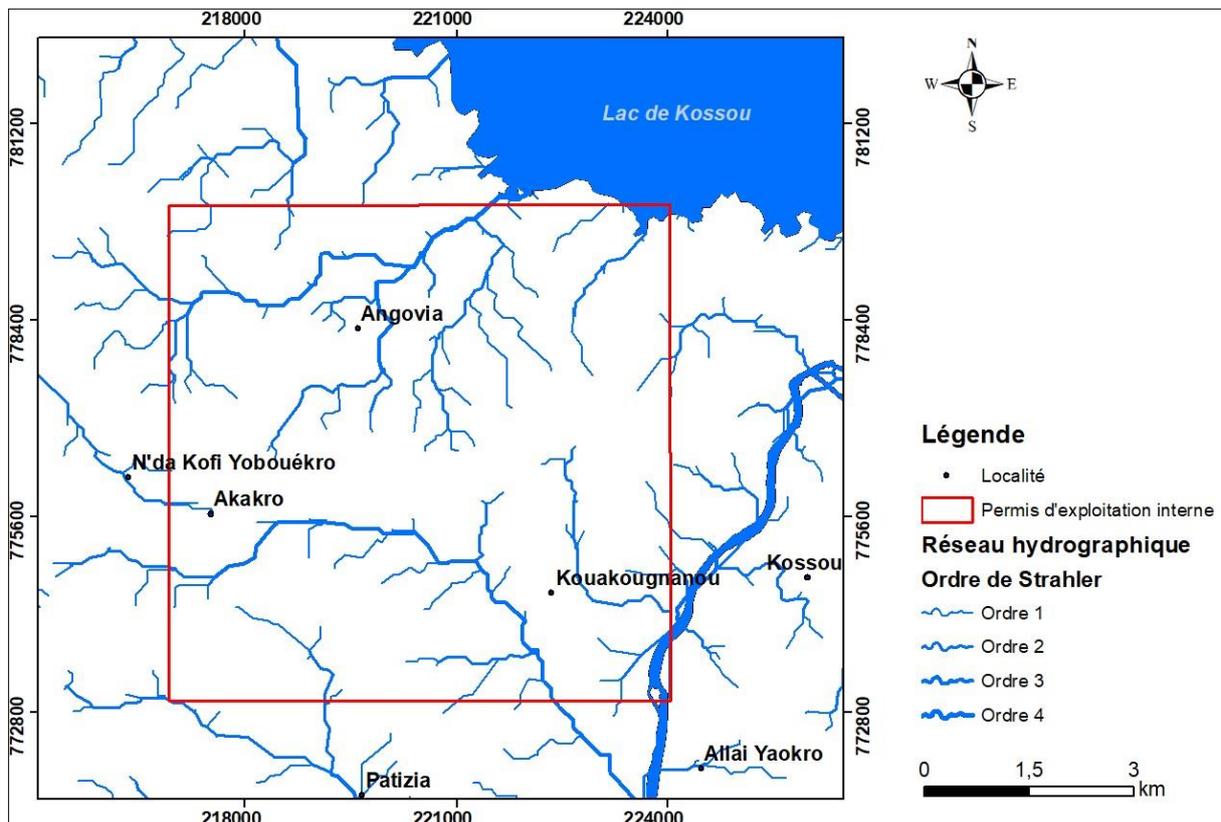


Figure 3 : Réseau hydrographique d'Angovia

1.1.2.5. Sol

Les sols issus de l'altération des roches métamorphiques, schisteuses et granitiques sont pour la plupart ferralitiques, moyennement dénaturés à dominance argilo-sableux. Ils se caractérisent par un horizon humifère peu épais mais riche en matières organiques, faiblement

acide et bien structurées. Ces sols offrent une bonne aptitude agricole et se prêtent bien à la culture de cacao (Kouamé, 2007).

1.1.3. Contexte géologique et hydrogéologique

1.1.3.1. Géologie

La Figure 4 présente la carte géologique du site minier d'Angovia réalisée par (Konan, 2020). Dans cette unité, le site Yaouré forme un synclinal de tholéitiques métavolcaniques recouverts par des sédiments volcaniques plus acides (Konan, 2020). Les roches tholéitiques sont supposées avoir été formées à la suite de modifications hydrothermales. Les acides recouvrant les roches sédimentaires sont considérés comme représentants pyroclastiques et des coulées pyroclastiques acides. Toutes les roches au-dessus ont été pénétrées à la base par des roches ultra plutoniques et des roches volcano-plutoniques acides intermédiaires calco-alcalines et l'ensemble est recouvert à son tour par le conglomérat polygénique Benou. Toutes ces roches ont été déformées par une série de cisaillement d'Est en Ouest et recoupées par des veines de quartz grisâtre. Des profils d'altération latéritique primaire et secondaire sont également développés tout au long de la zone au-dessus du conglomérat. La minéralisation aurifère semble être principalement située dans des zones d'altération contrôlée par la structure dans des roches volcaniques intermédiaires (Konan, 2020).

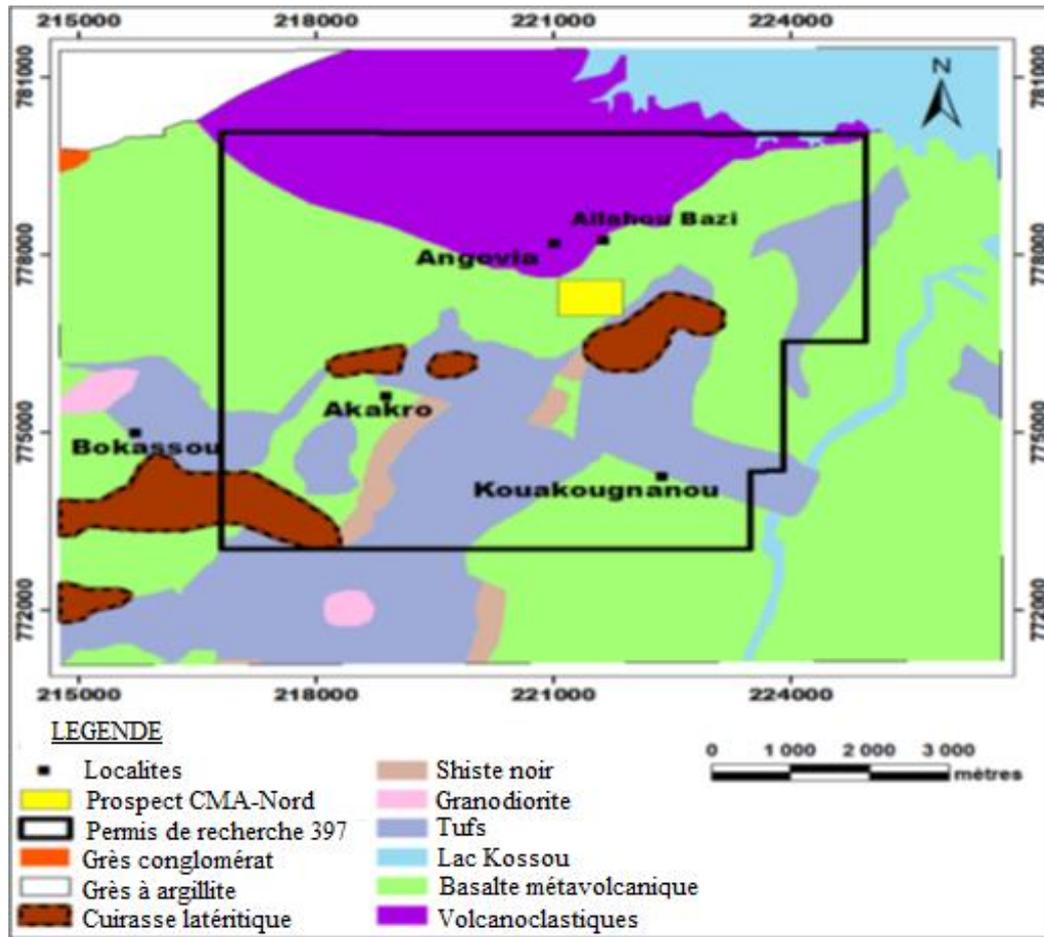


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'Angovia (Konan, 2020)

1.1.3.2. Aperçu hydrogéologique

Angovia est une zone de socle caractérisé par un aquifère discontinu. Il existe deux types d'aquifères : les aquifères d'altérites et les aquifères fracturés (Biémi, 1992). Les altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Ce sont des formations de surface résultant des processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ces aquifères d'altérites se développent dans les formations argilo-sableuses et dans les arènes granitiques. Les altérites issues des formations grenues sont constituées d'argiles, de sables, d'argiles sableuses et/ou d'argiles latéritiques.

Celles qui proviennent des roches granitiques sont représentées par un mélange de sables et d'argiles. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie. Son niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). La baisse du niveau d'eau pourrait être due au drainage des eaux souterraines vers les cours d'eau ou autres surfaces d'eau telles que les lacs, mais aussi aux puits et forages exploités (Maréchal *et al.*, 2004). Les aquifères de fissures qui sont sous-jacents aux aquifères d'altérites constituent des réservoirs beaucoup

plus importants. Ces aquifères naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre (Sawadogo, 1984). Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2004) dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. Par rapport aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution. Pour cela, dans les régions de socle, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités à partir des forages pour l'alimentation en eau des populations.

1.1.4. Aspect socio-économique de la région de la Marahoué

1.1.4.1. Populations

La population de la Marahoué est estimée à 862 344 habitants en 2014 (Institut National de la Statistique (INS), 2015). Elle est constituée de communautés ethniques différentes selon les régions. Ainsi, on y rencontre majoritairement : les peuples Gouros, Baoulé et Yaouré (dans les régions Sud de Bouaflé et au Nord de Zuénoula), puis les Malinkés et les Sénoufos peuplant majoritairement les régions septentrionales du bassin. Certains peuples tels que les Mona et les Ouan occupent les zones de Konahiri et Kongasso. De nombreuses populations de la sous-région ouest africaine se sont installées dans les zones forestières sud du bassin, attirées par des terres plus productives (Djè bi, 2015). Le site minier d'Angovia qui est le cadre de travail, est le gisement le plus important dans le secteur aurifère en Côte d'Ivoire. Il est situé dans une zone rurale, avec une population d'environ 2400 habitants (Kokobou, 2017).

1.1.4.2. Activités économiques

✓ Agriculture et élevage

L'agriculture est la première activité génératrice de revenu et elle contribue à la subsistance des populations de ces régions. Elle est essentiellement pluviale aussi bien pour les cultures de subsistances que de rentes (MINAGRI, 2014). Les cultures de subsistance ou vivrières (la banane plantain, l'igname, le maïs, le riz et le manioc occupent une place importante dans le tissu économique de la Marahoué. A celles-ci s'ajoutent les maraîchères (tomate, choux, poivron...).

✓ Secteurs industriels et commerciaux

Le tissu industriel se résume en grande partie à l'artisanat (tisserand, forgeron) et aux compagnies intervenant dans le domaine agroalimentaire. Ces compagnies sont entre autres SUCRIVOIRE à Zuénoula et SOLIBRA à Bouaflé. Aussi, la zone yaouré, en allant de Bozi jusqu'à Kouakougnanou, Angovia, Allahou-Bazi, Akakro, N'dakoffiyobouékro constitue un centre d'intérêt minier pour la production d'Or.

L'on distingue deux (02) circuits commerciaux : traditionnel et moderne. L'activité du circuit traditionnel s'exerce sous des marchés couverts et des hangars. Elle porte sur le commerce de denrées alimentaires d'origine agricole et halieutique ainsi que certains produits de première nécessité. Le commerce moderne est détenu par des opérateurs d'origine étrangère, notamment de la CEDEAO et du Liban avec une minorité d'Ivoiriens.

1.2. Généralités sur la modélisation hydrogéologique

1.2.1. Définition d'un modèle hydrogéologique

Un modèle hydrogéologique est une représentation plus ou moins conceptuelle d'un système ou plus simplement un instrument représentant une version simplifiée de la réalité (Ledoux, 1986).

1.2.2. Modèle conceptuel

Dans l'étude de l'écoulement des eaux souterraines, on développe la plupart du temps un modèle conceptuel. Le modèle conceptuel est moins complexe que le système réel. Il a pour but de simplifier le système à modéliser et d'organiser les données associées pour les prendre en compte dans un modèle numérique (Bear, 1972 ; Koffi, 2004). Il est statique et décrit la situation présente du système. Pour faire des prévisions avec le système, il est nécessaire d'avoir une sorte de modèle dynamique capable d'être manipulé (Fetter, 2001).

1.2.3. Modèle numérique

Les modèles numériques sont utilisés lorsque les conditions aux limites sont complexes ou lorsque les valeurs des paramètres varient à l'intérieur du modèle (Zheng et Bennett, 1995). Ils consistent à résoudre les équations aux dérivées partielles de base qui gouvernent l'écoulement des eaux souterraines. La fiabilité des prédictions utilisant les modèles numériques dépend de la manière dont ces modèles font l'approximation de la situation réelle.

1.2.4. Choix du logiciel

MODFLOW est développé en Fortran et permet la résolution numérique de l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies. Son efficacité a été prouvée par une utilisation mondiale massive. Il convient très bien pour des modèles simulés en 2D et 3D de systèmes complexes (Tirogo, 2016). Des travaux récents proposent néanmoins des solutions précises notamment sur la discrétisation du domaine pour une meilleure représentation des conditions d'écoulement de ces types de système (Gao, 2011 ; Pak, 2013 ; Soro, 2017 ; Kouassi, 2018). L'approvisionnement en eau de la population de la zone d'Angovia est assuré par les eaux souterraines contenues dans les réservoirs souterrains. La qualité et la quantité

des eaux souterraines sont menacées compte tenu des usages et activités anthropiques à la surface. C'est ainsi que le logiciel Visual ModFlow a été choisi pour modéliser l'écoulement des eaux souterraine dans le cadre de cette étude.

1.3. Impacts d'une activité minière sur la disponibilité de la ressource en eau souterraine

L'extraction de l'or peut épuiser des bassins d'eau souterraine et de surface. Au Nevada, l'Etat le plus sec des États-Unis, l'eau est drainée de la Humboldt river jusqu'à Carlin Trend pour l'extraction de l'or. Ainsi, 580 milliards de gallons d'eau ont été pompé par les miniers entre 1986 et 2001 (assez pour alimenter les robinets de New-York pendant plus d'une année). En Arizona du Sud, l'eau souterraine pompée du bassin Santa Cruz pour une usine de cuivre, réduit de plus en plus la nappe phréatique et assèche la rivière (Fondation de l'eau potable Sûre (FEPS), 2008). Aussi, la prospection et l'exploitation des ressources minérales et énergétiques en Afrique, impliquent-elles des activités peuvent qui potentiellement affecter de manière significative la quantité des ressources en eau souterraine existantes dans ces zones. Ce dénoyage des ouvrages souterrains est une composante normale de toute exploitation minière. Ce dénoyage abaisse nettement la nappe phréatique, ce qui affecte les écoulements souterrain et l'assèchement des aquifères peu profonds. À l'échelle locale, il peut y avoir des pénuries d'eau pour les communautés en raison de l'assèchement d'eau de surfaces (ruisseaux, rivières, étangs, marécages, lacs).

Conclusion partielle

Cette partie présente l'aspect physique et socio-économique de la zone d'Angovia. Dans l'ensemble, la région de la Marahoué a un climat de type Baouléen avec deux saisons (une saison sèche et une saison de pluie). Le relief est relativement monotone par endroit avec une végétation moins dense. Quant au réseau hydrographique, la région est drainée par de nombreux cours d'eaux.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

2.1.1. Données

Dans le cadre de cette étude, plusieurs données ont été utilisées ; ce sont :

- les données climatologiques ;
- les données cartographiques ;
- les données de forages ;
- les données piézométriques.

2.1.1.1. Données climatologiques

Les données climatologiques proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Ce sont les données de pluies et de températures au pas de temps mensuel observées dans le complexe sucrier de Zuénoula sur la période 1990 à 2019 et à la station d'Angovia sur la période 2009-2018. Ces données ont permis respectivement de tracer le diagramme ombrothermique et de faire le bilan hydrologique de la Zone.

2.1.1.2. Données d'essais de pompage et de piézométrie

Les données d'essai de pompage proviennent respectivement des fiches d'essai de pompage de 11 forages notés ESIAG1, ESIAG2, ESIAG3, ESIAG4, ESIAG5, ESIAG6, ESIAG7, ESIAG8, YDD0359, YRC0766 et YRC0767. Ces données ont été recueillies à la direction territoriale de l'hydraulique (DTH) de Bouaflé et auprès de la nouvelle société d'exploitation de la mine d'or d'Angovia. Ces données concernent les épaisseurs d'altérites (EA), les arrivées d'eau (AE), la profondeur totale (Pt) et le niveau statique (NS). Les essais réalisés sont de courte durée (2 heures avec 2 heures de remontée). Les données piézométriques utilisées couvrent la période 2015 à 2017.

2.1.2. Outils

2.1.2.1. Matériel de collecte de données

Un GPS (figure 5a) a permis de relever les coordonnées géographiques des points d'échantillonnage, un infiltromètre à double anneau (figure 5b) a été utilisé pour mesurer la perméabilité *in situ*. Pour les échantillons de sol, une tarière (figure 5c) a permis de faire des prélèvements qui ont par la suite été étiquetés et conditionnés dans des sachets afin d'être acheminés au Laboratoire de pédologie de l'Institut Polytechnique Houphouët Boigny de Yamoussoukro (INPHB) pour la détermination de la porosité.



Figure 5 : Matériel de collecte (A : GPS ; B : Infiltromètre ; C : Tarière)

2.1.2.2. Outils de traitement de données

Les outils de traitement de données nécessaires pour la réalisation de cette étude sont les suivants :

- le tableur Excel 2013 a été utilisé pour le traitement des données ;
- le logiciel surfer 17 qui permet d'élaborer les cartes d'isovaleur à partir des données (longitude, latitude et valeurs) ;
- logiciel ArcGIS 10.4.1 a servi à la réalisation des différentes cartes ;
- le logiciel visual MODFLOW 4.6 pour la modélisation hydrogéologique.

2.2. Méthodes

2.2.1. Estimation de la recharge

2.2.1.1. Bilan hydrologique

L'objectif de cette méthode est d'évaluer les entrées et les sorties en eau sur le bassin versant ou une région, sur des périodes plus ou moins grandes. Elle est basée sur la détermination de l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'infiltration totale (équation 1).

$$P = (ETR+R) + I + \Delta S \quad (\text{Eq.1})$$

avec :

P : précipitations (mm) ;

R : ruissellements (mm) ;

ΔS : variation de stock d'eau

ETR : évapotranspiration réelle (mm) ;

I : Infiltration (mm).

➤ **L'Évapotranspiration Potentielle (ETP)**

L'expression de l'ETP selon Thornthwaite est la suivante :

$$ETP \text{ (mm/an)} = 1.6 * \left(\frac{10\theta}{I}\right)^a * F(\lambda) \quad (\text{Eq.2})$$

avec :

θ = Température mensuelle moyenne en degré Celsius ;

a est une fonction complexe de l'indice I ;

$$a = 6,75.10^{-7} I^3 - 7,71.10^{-5} I^2 + 1,79.10^{-2} I + 0,49239 \quad (\text{Eq.3})$$

I représente un indice thermique annuel, somme de douze indices thermiques mensuels i ,

$F(I)$ = coefficient de correction en fonction de la latitude du lieu considéré (donné par des tables).

➤ **Évapotranspiration Réelle (ETR)**

En modélisation, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est souvent utilisée car, contrairement à l'évapotranspiration réelle (ETR), son estimation ne nécessite que la connaissance de paramètres liés à l'atmosphère.

2.2.1.2. Estimation de l'infiltration

La connaissance du taux de renouvellement des eaux souterraines est un facteur essentiel dans tout programme de développement durable basé sur l'exploitation et la gestion des réserves en eaux souterraines. Ce renouvellement est appelé recharge. Il est le flux d'eau qui reconstitue ou réapprovisionne un aquifère, essentiellement par percolation à travers le sol. La recharge peut être faite verticalement ou latéralement à partir d'un autre système aquifère. Elle peut être naturelle et provenir des précipitations et/ou des écoulements de surface, ou artificielle et provenir d'un apport intentionnel d'eau au sol. Les mécanismes régissant la recharge naturelle des aquifères peuvent être décrits comme suit (Kingumbi, 2006) :

- la recharge par percolation verticale des précipitations à travers la zone non saturée, appelée recharge directe ;
- la recharge à partir d'eau en provenance d'autres aquifères ;
- et la recharge par percolation de l'eau à travers les lits des cours d'eau appelée recharge indirecte. En effet, la recharge d'un aquifère par la précipitation est contrôlée par le processus complexe de l'infiltration, de l'écoulement dans la zone non saturée et du phénomène de l'évapotranspiration (Healy & Cook, 2002). Malgré cette complexité, une estimation de la recharge des nappes est indispensable pour une gestion optimale des ressources en eaux souterraines. Par ailleurs, elle est un élément clé dans tout modèle d'écoulement des eaux souterraines ou de transport des contaminants (Healy & Cook, 2002).

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la recharge et le choix d'une ou de plusieurs méthodes peut être guidé par les données disponibles, l'échelle de l'étude et la précision des résultats recherchées (Soro, 2017). Dans cette étude, la recharge a été estimée par la méthode de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) suivie de l'approche du bilan hydrologique. La méthode de Thornthwaite utilise uniquement les données de pluie et de température. En fonction de la nature du sol, une valeur de Réserve Facilement Utilisable (RFU) est fixée. Pour les sols de nature argilo-sableuse comme celle de la Marahoué (Djè bi, 2015) la RFU est fixée à 100 mm au mois qui précède (Aôut) le mois de plus grande hauteur de pluie (Septembre) de l'année pour commencer les calculs.

Le bilan hydrologique permet de connaître les apports et les pertes en eau du bassin et donc de quantifier de façon globale les ressources en eau. En effet, il traduit de manière quantifiable le cycle de l'eau au niveau d'une région ou d'un bassin versant. Il exprime le partage des précipitations entre les différentes composantes du cycle de l'eau (Equation 4).

$$P = R + ETR + I \quad (\text{Eq.4})$$

avec :

P : précipitation (mm)

R : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm).

Le ruissellement (R) représente la part de la pluie qui alimente le réseau de surface. Il est très dépendant des facteurs physiques et morphologiques du bassin versant, notamment le relief, le contexte géologique, le couvert végétal, la forme, l'orientation et la densité du réseau hydrographique. Son estimation fait intervenir les facteurs climatiques dont la pluie, l'évaporation, la température, l'insolation, les vents et l'humidité de l'air. Les approches permettant de répartir le surplus disponible entre l'écoulement et l'infiltration ne tiennent pas compte des nombreux facteurs environnementaux, morphologiques, géologiques et climatiques énoncés plus haut.

Le ruissellement (R) permet de calculer le coefficient de ruissellement (r) de la région. Les expressions respectives de ces paramètres sont les suivantes : (Equation 5).

$$R = \frac{P \times t}{S} \text{ et } r = \frac{R}{P} \times 100 \quad (\text{Eq.5})$$

avec :

R : La lame d'eau ruisselée ;

P : précipitation moyenne annuelle de la période d'observation ;

t : temps en seconde d'une année d'observation ($t=3155600$ s) ;

S : la superficie totale de la région ;

r : coefficient de ruissellement en pourcentage.

L'évaluation de l'infiltration dans la région est très importante pour une connaissance de la quantité d'eau qui alimente les eaux souterraines chaque année. La détermination de la recharge ou de la réalimentation des aquifères est fondée essentiellement sur le bilan hydrique. Ainsi, la formule de l'infiltration (Equation 6) est tirée de celle de l'équation du bilan hydrologique :

$$I=p-(ETR+R) \quad (\text{Eq.6})$$

2.2.1.3. Etude piézométrique

La piézométrie est la cote de l'eau dans un ouvrage d'observation (piézomètre) par rapport à un référentiel donné. La piézométrie a pour objectif de suivre la variation du niveau de la surface libre de la nappe (sa fluctuation), d'élaborer les cartes des hautes et basses eaux (Ouédraogo, 2016). Elle permet d'identifier les directions et les sens d'écoulements permettant ainsi de savoir les zones de recharge préférentielles, les zones de transition et les exutoires. Pour ce faire, une carte piézométrique est réalisée. La carte piézométrique qui est une synthèse essentielle de l'étude hydrogéologique schématise la fonction conductrice du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Elle représente à une date donnée, la distribution spatiale des charges. Dans le cadre de cette étude, deux cartes piézométriques ont été réalisées dans le but d'évaluer la variation du niveau d'eau en périodes de basses et hautes eaux. Pour calculer les cotes piézométriques la priorité est donnée à la précision du nivellement et à la date à laquelle les mesures ont été effectuées. Les cotes piézométriques sont déterminées à partir de la formule de Kouassi (2013) (Equation 7).

$$H = Z - (P - H_m) \quad (\text{Eq.7})$$

avec :

H : Cote piézométrique (m) ;

Z : Cote sol ou élévation du terrain naturel (m) ;

P : Profondeur mesurée (m) ;

H_m : Hauteur de la margelle (m).

Cette expression de la piézométrie de (Castany, 1982) est pour les nappes libres. Toutefois pour une question d'indication (appréciation) momentanée du niveau d'eau sur l'ensemble de la zone nous admettons l'hypothèse selon laquelle la formation située sur le socle est un milieu poreux continu. La cote sol Z de tous les points de mesures est inconnue, la cote

piézométrique H ne peut donc être déduite. Pour pallier cette difficulté, la surface du sol a été considérée comme le repère avec zéro mètre (0 m). Ainsi, pour chaque profondeur mesurée, et après avoir retranché la hauteur de la margelle (H_m), il lui a été affecté le coefficient (-1) traduisant le sens de mesure du haut vers le bas. Cette méthode a permis de représenter le niveau de l'eau dans chaque ouvrage à partir de la surface topographique.

2.2.2. Détermination des propriétés hydrauliques du système aquifère

2.2.2.1. Transmissivité

La transmissivité a été déterminée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob en remontée.

Elle repose sur le principe de superposition. L'application de cette méthode suppose qu'un certain nombre de conditions soit satisfait à savoir :

L'aquifère a une extension latérale infinie ; le diamètre du puits est négligeable ; le puits est parfait ; l'aquifère est captif ; l'aquifère est homogène, isotrope, d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage et l'écoulement vers le puits est transitoire (Koita, 2005; Fossou, 2010).

Dans bien des cas, les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions. Selon Lasm (2000), cette situation n'empêche cependant pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages, qui donnent des résultats significatifs et représentatifs des aquifères quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques. En effet, à l'arrêt du pompage, l'eau souterraine continue de s'écouler en direction de l'ouvrage de captage. Le niveau de l'eau dans le forage remonte et simultanément le niveau piézométrique de la surface de dépression s'élève. Dans ces conditions, le rabattement résiduel S_r obtenu s'écrit selon l'équation 6 :

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[\frac{4Tt}{(r)^2 S'} - \ln \frac{4Tt'}{(r)^2 S'} \right] \quad (\text{Eq.8})$$

S_r : rabattement résiduel (m) ; r : distance entre le piézomètre d'observation et l'ouvrage (m) ;

S' : coefficient d'emmagasinement de la remontée (sans unité) ;

S : coefficient d'emmagasinement de la descente (sans unité) ;

t : temps depuis le début du pompage (s ou min ou h) ;

Q : débit de la remontée (moyenne des débits du pompage) en m^3/h .

En supposant que $S=S'$ on obtient selon les équations 9 et 10 les expressions de S_r et T :

$$S_r = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad \text{et} \quad (\text{Eq.9})$$

$$T = \frac{0.183Q}{\alpha} \quad (\text{Eq.10})$$

Avec : α , la pente de la droite obtenue en représentant s_r en fonction de $\log t/t'$ ($S_r = f(\log(t/t'))$) sur du papier semi-logarithmique (t/t' est porté en échelle logarithmique).

2.2.2.2. Perméabilités

➤ Perméabilité des altérites

La méthode fondée sur le principe de l'infiltration à charge constante sur lequel est basé la Méthode de Porchet a été utilisée. Ce test permet de mesurer la conductivité hydraulique à saturation d'un sol (ou perméabilité), celle-ci définissant l'aptitude du sol à permettre l'infiltration de l'eau. L'appareil est composé de deux anneaux (diamètres 30 et 50 cm) enfoncés dans le sol de 5 cm et rempli d'eau. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration. Notons que durant toute la mesure, on doit veiller à ce que les niveaux d'eau dans les deux anneaux restent les mêmes (au besoin, on modifie celui de l'anneau externe). On suppose que sous l'anneau interne l'infiltration est verticale. Au bout d'un certain temps, un régime permanent s'installe et la vitesse d'infiltration devient constante. C'est à partir de la valeur de cette vitesse que l'on déduit la valeur du coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy (équation 11).

$$Q = K * S \left(\frac{H}{L} \right) \quad (\text{Eq.11})$$

avec :

Q = Quantité d'eau percolée (mm^3/h) ;

H = Charge d'eau (mm) ;

L = Longueur de la colonne de terre (mm) ;

S = Surface de la section de la colonne d'eau (mm^2) ;

K = Conductivité hydraulique ou coefficient de la perméabilité (mm/h).

La loi de Darcy est appliquée à une colonne de sol saturée soumise à un écoulement unidimensionnel dans un milieu homogène et isotrope. Avec H/L : la pente hydraulique. Après simplification de l'équation 4, on obtient l'équation 8.

$$K = \left(\frac{Q}{S} \right) \quad (\text{Eq.12})$$

➤ Perméabilité des aquifères

La propriété de conduite d'un aquifère est contrôlée par sa perméabilité ou conductivité hydraulique. Celle-ci est la capacité du milieu à laisser circuler l'eau généralement exprimée par le coefficient de perméabilité K de Darcy. Elle dépend des caractéristiques du milieu et du fluide. Elle a la dimension d'une vitesse. Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité et la

perméabilité, mais pour être perméable la roche doit être obligatoirement poreuse (Castany, 1982). Les possibilités de circulation d'eau dans un aquifère dépendent de K et de son épaisseur mouillée (e) en m. Cela induit la notion de transmissivité T s'exprimant en m^2/s (équation 13)

$$T = K * e \text{ d'où } K = \frac{T}{e} \quad (\text{Eq.13})$$

avec :

K = Perméabilités (m/s) ; T = Transmissivités (m^2/s) ; e = épaisseurs mouillées (m).

2.2.2.3. Porosités

➤ Porosité totale

Elle est égale au rapport du volume des vides (V_v) d'un échantillon du milieu, au volume total (V_t) de l'échantillon (Castany, 1982) et est déterminée à partir de l'équation 14 :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{Eq.14})$$

➤ Porosité efficace

De ce qui précède, on constate que dans un milieu poreux, la porosité totale représente la proportion des vides remplis d'eau si le milieu est saturé. Une partie de cette eau sera retenue par les particules du sol (eau liée) et les pores vacuolaires fermés et une autre partie va s'écouler pour recharger la nappe (Kouassi, 2013). C'est ce volume d'eau gravitaire qui constitue la porosité efficace. Elle est calculée par le rapport ci-dessous :

$$\text{Porosité efficace} = \frac{\text{volume d'eau libre}}{\text{volume total de la roche}}$$

Elle est en pourcentage. Mais peut aussi être exprimé en millimètres de hauteur d'eau pour la surface concernée (Roger, 1996).

2.2.3. Méthodologie de réalisation du modèle numérique

La réalisation d'un modèle numérique nécessite plusieurs étapes telles que la détermination des objectifs à atteindre, le choix du logiciel utilisé, la conception des modèles conceptuel et numérique, le calage et la validation du modèle numérique, la réalisation de simulations prédictives et enfin l'analyse critique des résultats obtenus. Les sections qui suivent décrivent la méthodologie utilisée.

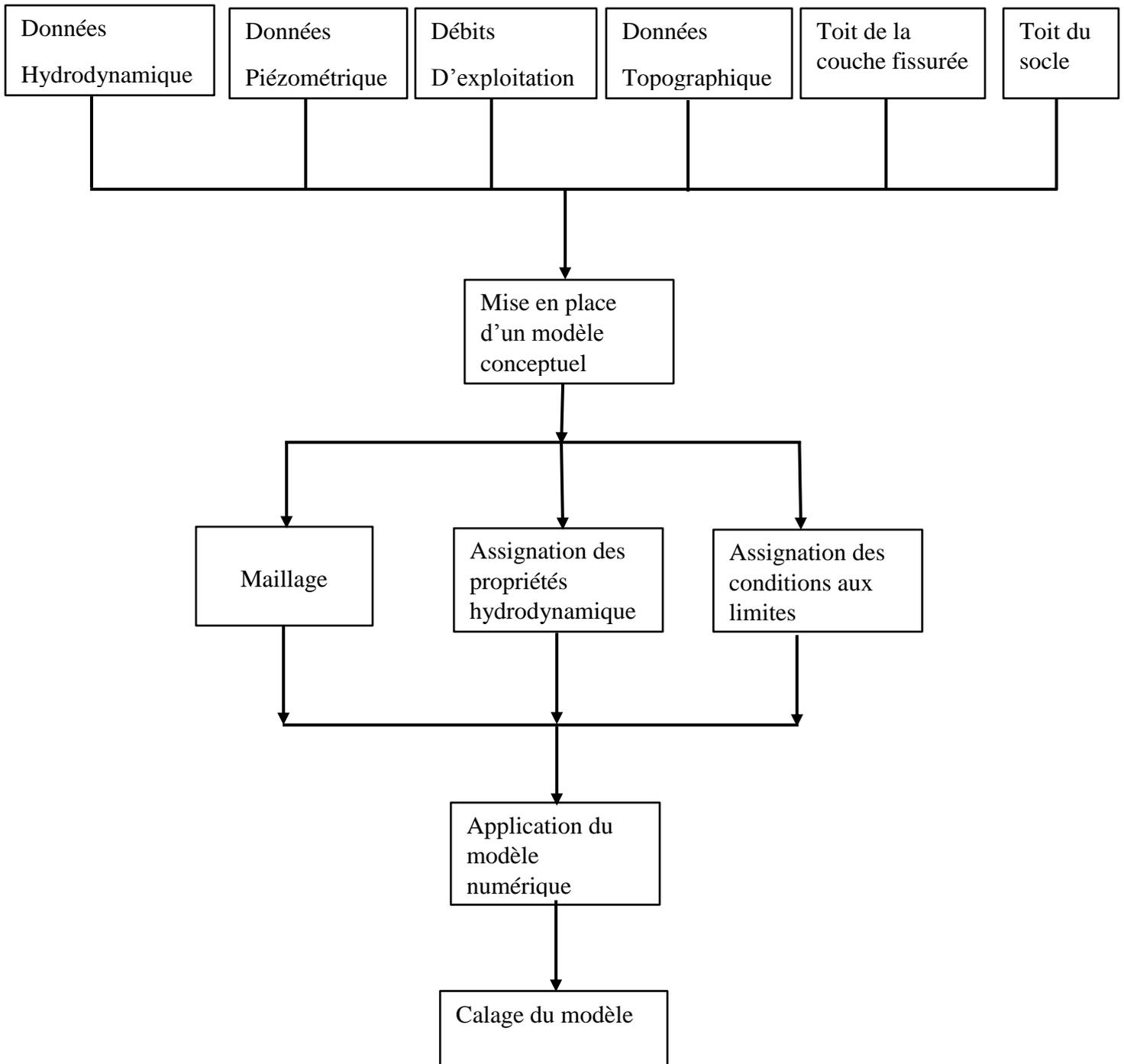


Figure 6 : Organigramme pour la conception du modèle hydrogéologique (Kouamé, 2007)

2.2.3.1. Présentation du logiciel utilisé

Dans le cadre de ce travail, le logiciel Visual ModFlow version 4.6 a été choisi pour modéliser l'écoulement souterrain. Les équations fondamentales permettant la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine proviennent de deux sources :

- **La loi de conservation du moment, dont la loi de Darcy pour un milieu poreux en est un exemple :**

$$q = K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{Eq.15})$$

avec :

q : Flux volumique ;

K : Perméabilité de Darcy ;

h : Charge hydraulique.

- **L'équation de diffusivité qui exprime la conservation de la masse :**

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, t) \quad (\text{Eq.16})$$

avec :

qx, qy, qz : Flux entrant ou sortant à travers la nappe ;

h : Charge hydraulique ;

Ss : Coefficient d'emmagasinement ;

t : Temps ;

W : Flux volumétrique par unité de volume représentant le terme source.

La combinaison des équations 6 et 7 moyennant des hypothèses simplificatrices, conduit à l'établissement d'une équation aux dérivées partielles représentant le modèle conceptuel de l'écoulement en trois dimensions dans un milieu poreux : c'est l'équation fondamentale du mouvement qui s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Eq.17})$$

Avec :

Kxx, Kyy, Kzz : Perméabilités selon les trois directions de l'espace (x, y, z);

h : Charge hydraulique ;

Ss : Emmagasinement spécifique du milieu poreux ;

t : Temps ;

W : Flux d'échanges verticaux par unité de volume.

A partir de l'expression de la variation de la charge hydraulique en fonction du temps ($\frac{\partial h}{\partial t}$), deux régimes sont déterminés :

- un régime permanent si $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ (h est considéré constant) ;
- un régime transitoire si $\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$ (h varie en fonction du temps).

➤ **Méthode des différences finies**

Le domaine est discrétisé en cellules le plus souvent rectangulaires. Les paramètres sont introduits par moyenne, équivalente et représentative de chaque cellule. L'approximation de la solution de l'équation par cette méthode consiste à remplacer les dérivées spatiales et temporelles par des différences finies. L'utilisation de la méthode des différences finies est plus difficile pour des géométries très complexes, totalement en 3D et très hétérogènes. L'anisotropie n'est habituellement prise en compte que parallèlement aux côtés des cellules.

➤ **Conditions initiales**

✓ **Porosités**

La porosité totale est comprise entre 0 et 10 % en milieu de socle. Quant à la porosité efficace, elle est comprise en 0 et 1 %. Etant donné que nous n'avons pas eu le matériel et les données nécessaires pour estimer ce paramètre, nous avons utilisé des valeurs moyennes 5% et 0,5 % respectivement pour la porosité totale et efficace comme valeurs initiales dans le modèle.

✓ **Conductivité hydraulique et Coefficient d'emmagasinement**

Les conductivités hydrauliques obtenues sont issues de l'interprétation par la méthode de Theis des fiches d'essai de pompage.

La conductivité hydraulique de la nappe a été calculée en divisant la transmissivité obtenue par l'épaisseur de la zone captée par le forage. Le milieu étant caractérisé par des alternances fréquentes de bancs (ou lentilles) sub-horizontaux d'argiles et de sables, la conductivité verticale (équation 18) a été considérée comme étant au moins dix fois plus faible que la conductivité horizontale (Massuel, 2001) :

$$K_z = \frac{K_{xy}}{10} \text{ (m/s)} \quad \text{(Eq.18)}$$

2.2.3.2. Géométrie du modèle

Dans notre cas, le domaine hydrogéologique modélisé est considéré comme étant un système monocouche, constitué de pores d'interstices. Le choix du système monocouche a été conditionné par la quantité et la qualité des données disponibles.

2.2.3.3. Présentation de la carte des linéaments

La carte détaillée des linéaments (Figure 7) compte 170 linéaments extraits manuellement à partir de l'interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitement. La longueur cumulée des linéaments est égale à 266 Km. L'exploitation de la carte du relevé détaillé des linéaments permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques à partir desquels est définie et caractérisée la géométrie des aquifères souterrains.

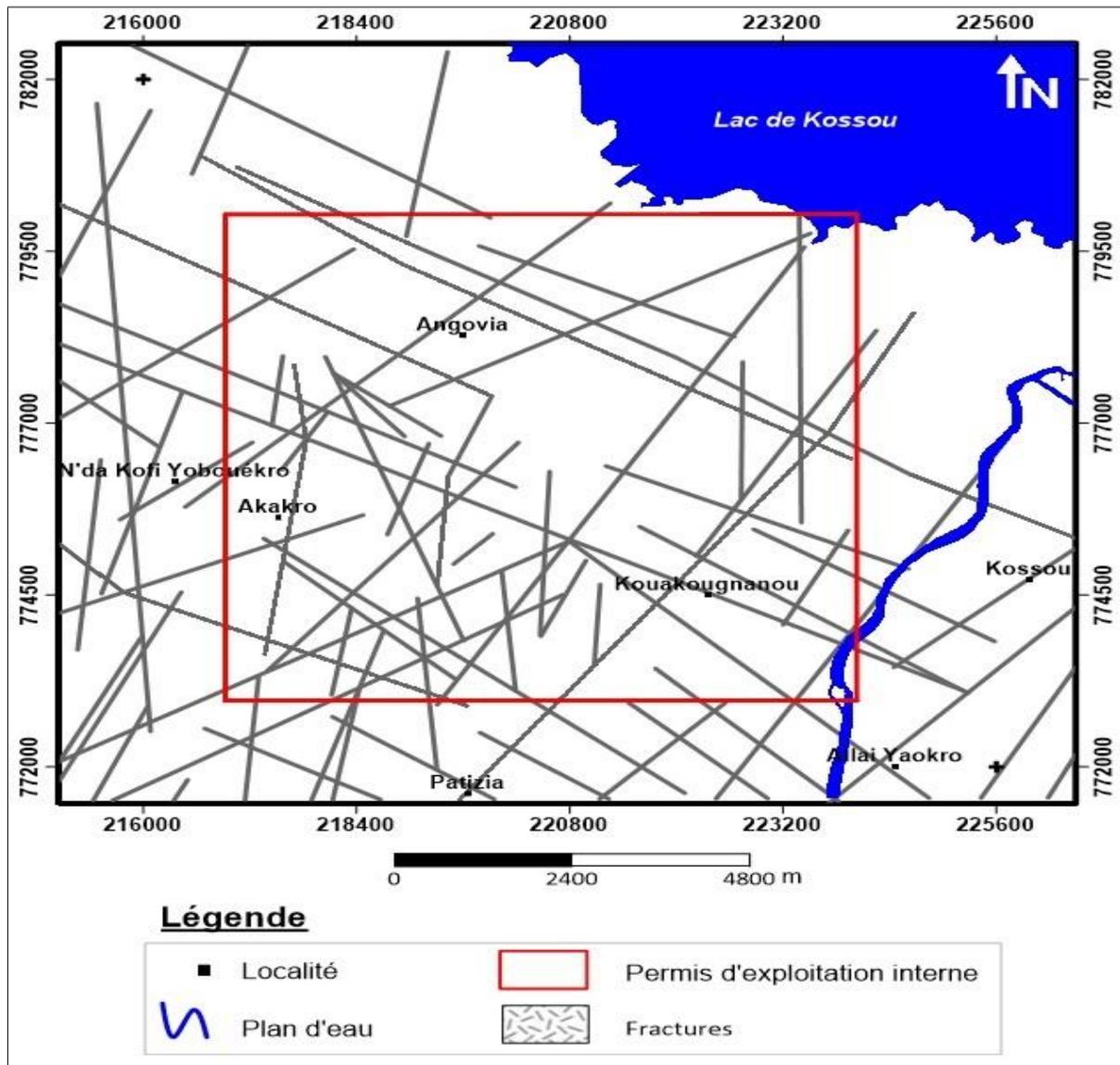


Figure 7 : Carte des fractures

2.2.3.4. Conditions aux limites du modèle

L'identification du comportement hydrodynamique de l'aquifère repose sur une définition rigoureuse des conditions aux limites (Castany, 1998). On distingue les conditions aux limites suivantes :

✓ **Limites à potentiel imposé (condition de Dirichlet).**

Ces limites sont constituées de hauteurs piézométriques imposées aux frontières Ouest et Est du modèle. Les hauteurs piézométriques imposées aux nœuds de ces frontières seraient ceux des niveaux piézométriques mesurés des forages ESIA/G3, ESIA/G8 et le forage ESIA/G4 respectivement à l'Ouest et à l'Est du domaine. Une fois spécifiées les différentes conditions aux limites et les propriétés hydrodynamiques de la couche, la simulation numérique est faite selon l'approche milieu continu équivalent et isotrope. Les conductivités hydrauliques sont considérées constantes sur l'ensemble du domaine. Tandis que, les charges piézométriques sont considérées variable sur l'ensemble du domaine.

✓ **Limites à flux imposé (conditions de Neumann)**

On les regroupe de la façon suivante :

- Les limites à flux imposé non nul. Ces limites peuvent être un affleurement d'une nappe où le flux entrant est inférieur au flux pouvant s'écouler dans la nappe, un prélèvement à débit constant dans un ouvrage (puits, tranchée, etc.) et le contact entre deux aquifères de conductivités hydrauliques différentes
- Les limites à flux nul le long d'une limite imperméable, le flux normal à la limite est nul.

✓ **Recharge**

La recharge est celle estimée en objectif spécifique 1, avec une infiltration totale qui contribue à la recharge des nappes est de l'ordre de 46,5 mm/an (Tableau I). Cette lame d'eau représente environ 4 % de la pluie.

2.2.3.5. Simulation numérique

➤ **Calage du modèle en régime permanent**

Le but du calage est de montrer que le modèle peut reproduire les charges et les écoulements mesurés sur le terrain. Le calage est fait en ajustant la conductivité hydraulique, la porosité, le coefficient d'emménagement et/ou la recharge afin de minimiser la différence entre les charges observées et les charges calculées au niveau des puits qui ont permis de faire les observations. Ce processus "d'essai/erreur" s'est déroulé comme suit :

- ajustement des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité efficace, coefficient d'emménagement ou de la recharge) ;
- simulation du modèle ;
- comparaison des valeurs de charge calculée aux valeurs de charges mesurées (si les écarts sont grands alors on reprend le processus).

Afin de faciliter l'ajustement de ces paramètres, le calage du modèle s'effectue en régime permanent. Ces opérations sont exécutées jusqu'à ce qu'on obtienne des faibles valeurs d'écart de calage traduisant ainsi un bon calage entre les charges "observées" sur le terrain et celles "calculées" par le modèle (Gurwin & Lubezynski, 2004). Les éléments qui permettent d'apprécier une telle calibration sont :

- moyenne des écarts ou Residual Mean (\bar{R}) (m) est une mesure de la valeur moyenne des erreurs de calibration définie par l'équation 19 :

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (\text{Eq. 19})$$

avec :

n : nombre de forages

R_i : écart de calibration entre les valeurs de piézométrie mesurées (H_{obs}) sur le terrain et celles calculées (H_{cal}) par le logiciel où :

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{cal} - H_{obs})_i \quad (\text{Eq. 20})$$

- moyenne de la valeur absolue des écarts (m) ou Absolute Residual Mean (\bar{R}) (m) est la valeur absolue des écarts :

$$|\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i| \quad (\text{Eq. 21})$$

La moyenne de la valeur absolue des écarts mesure l'importance moyenne des écarts et fournit une meilleure indication de calage que R.

- écart-type des erreurs ou Standard Error of the Estimate (SEE) (m) est un type d'évaluation des erreurs et est exprimé par l'équation 22 :

$$SEE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n}} \quad (\text{Eq. 22})$$

- racine carrée de la moyenne des écarts ou Root Mean Squared Residual (RMS) (m) est définie par l'équation 23 :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (\text{Eq. 23})$$

- EQM : Ecart quadratique moyen est exprimé par l'équation 24

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{X})^2} \quad (\text{Eq. 24})$$

\bar{X} : Moyenne des carrés des écarts

n : Nombre de points

x : Différences entre charges observées et simulées

- racine carrée de la moyenne des écarts normalisée ou Normalized Root Mean Squared

Residual (NRMS) (%) est exprimée par l'équation 25.

$$\text{Normalized RMS} = \frac{\text{RMS}}{(\text{Hobs})_{\text{Max}} - (\text{Hobs})_{\text{Min}}} \quad (\text{Eq. 25})$$

La racine carrée de la moyenne des écarts normalisée ou NRMS est exprimée en pourcentage. Elle est le paramètre le plus représentatif de l'ajustement du modèle et sa valeur doit être inférieure à 10% pour qu'un calage soit déclaré adéquat (Kouamé, 2007b).

Conclusion partielle

Le but de cette deuxième partie était d'énumérer les données, les outils et la mise en place d'un cadre méthodologique permettant d'une part de caractériser le système aquifère de la zone d'Angovia, d'autre part de faire la mise en place d'un modèle d'écoulement souterrain. Le matériel et les méthodes présentés dans cette partie nous ont permis d'obtenir des résultats. La présentation et la discussion de ces résultats font l'objet de la troisième partie.

TROISIEME PARTIE : RESULTAS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Estimation de la recharge

3.1.1.1. Bilan hydrologique

➤ **Evapotranspiration réelle**

La pluviométrie moyenne annuelle mesurée à la station de la mine d'or d'Angovia est de 1174 mm sur la période 2009 à 2018. Les pertes par évapotranspiration réelle estimées valent 1124 mm (Tableau I). Ces pertes représentent globalement 95,7 % des précipitations. Ces résultats supposent que les potentialités en eau de surface et souterraine qui en découlent sont relativement peu abondantes. En effet, les écoulements de surface sont estimés à 3,5 mm soit 0,3 % des précipitations moyennes.

➤ **Infiltration**

L'infiltration totale qui contribue à la recharge des nappes est de l'ordre de 46,5 mm/an (Tableau I). Cette lame d'eau représente environ 4 % de la pluie.

Table 1 : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à Angovia de 2009-2018.

	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)
Janvier	4	234	4
Février	54	186	54
Mars	121	202	117
Avril	165	174	132
Mai	179	167	156
Juin	136	146	124
Juillet	72	125	93
Août	107	125	93
Septembre	121	128	107
Octobre	152	139	125
Novembre	56	141	94
Décembre	8	140	24
R		3,5	
I		46,5	

3.1.1.2. Etude piézométrique

Les résultats de l'étude de la piézométrie sont présentés en deux parties. La première porte sur l'analyse spatiale des niveaux piézométriques et la seconde partie concerne l'analyse des fluctuations interannuelles des charges piézométriques.

✓ **Variation spatiale de la piézométrie**

Cette analyse a été faite à partir des cartes piézométriques réalisées avec les données de basses eaux, et de hautes eaux de la zone d'étude. Les cartes des figures 8a et 8b ci-dessous présentent la piézométrie de la zone d'étude pour la période de basses eaux (janvier 2015) et de hautes eaux (Mai 2015). Ces deux cartes ne présentent pas de différence notable. Elles présentent une zone de décharge et une zone de recharge avec un écoulement qui s'effectue dans plusieurs sens principalement de l'Ouest vers l'Est. La zone de décharge se situe au Sud-est autour de l'ouvrage ESIA/G5. La zones de recharges quant à elle est caractérisée par une zone où prend naissance les grands axes d'écoulement. Elle est située à l'Est de la zone autour des ouvrages YDD0359, YRC767 et ESIA/G6 (Figure 8a et 8b).

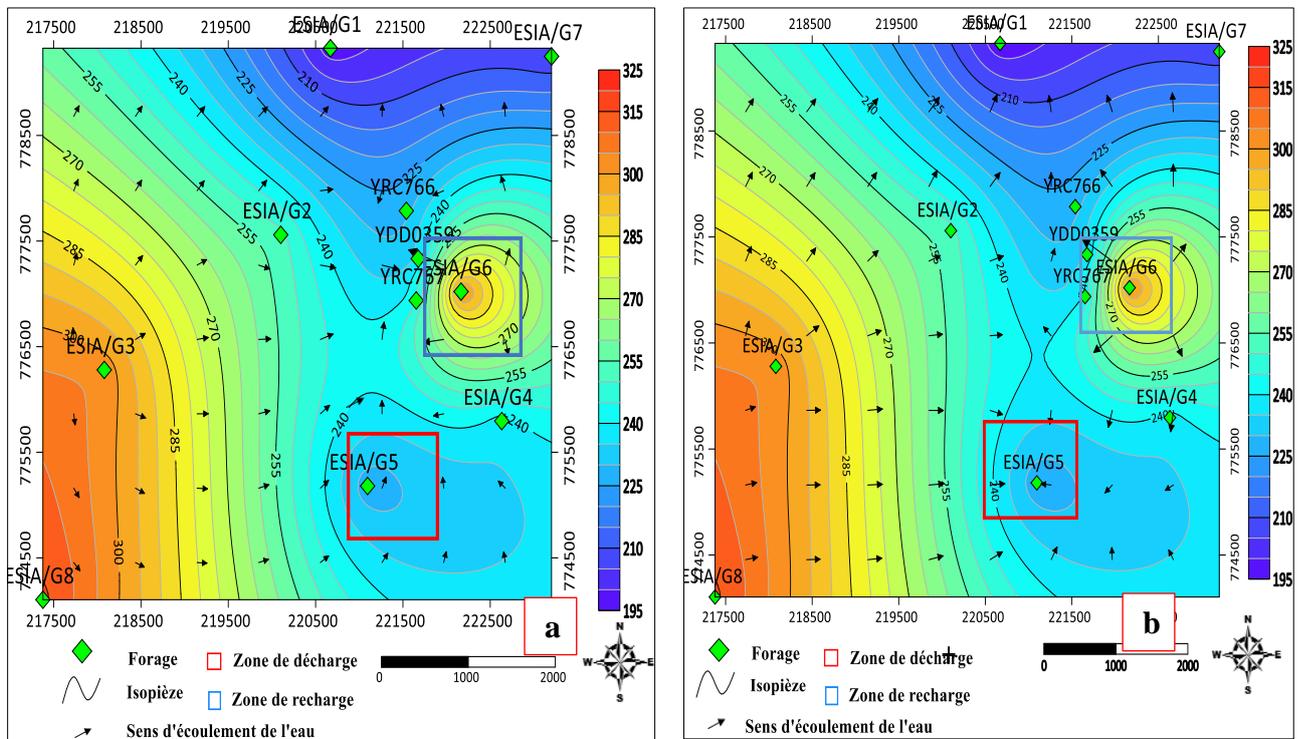


Figure 8 : Cartes piézométriques de basses eaux (a) et de hautes eaux (b) en 2015

3.1.2. Paramètres hydrodynamique du système aquifère

3.1.2.1. Transmissivité

Les valeurs de transmissivité ont été déterminées pour 12 forages repartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Elles sont comprises entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne géométrique de $2,47 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. L'écart type est de l'ordre $1,11 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Tableau II). La classe la plus prépondérante est 10^{-5} et elle représente 50% de l'effectif total des ouvrages.

Tableau I : Différentes classes de transmissivité de la zone d'Angovia

Classes	Pourcentages (%)	Min	Moyenne	Maxi	Ecartype
10^{-6}	16,67				
10^{-5}	50	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$
10^{-4}	33,33				

3.1.2.2. Perméabilités du système aquifère

Le tableau III montre que les perméabilités des aquifères calculées à partir des fiches d'essai de pompage varie de $1,23 \cdot 10^{-7}$ à $1,52 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Tableau II : Perméabilités de la couche d'aquifère de la zone d'Angovia

Perméabilité (m/s)	
Min	$1,23 \cdot 10^{-7}$
Moyenne	$3,37 \cdot 10^{-6}$
Max	$1,52 \cdot 10^{-5}$
Ecartype	$4,52 \cdot 10^{-6}$

3.1.2.3. Perméabilités de la couche d'altérite

Tableau III : Perméabilités de la couche d'altérite de la zone d'Angovia

Perméabilité (m/s)	
Min	$1,69 \cdot 10^{-8}$
Moyenne	$1,97 \cdot 10^{-7}$
Max	$4,42 \cdot 10^{-7}$
Ecartype	$1,54 \cdot 10^{-7}$

3.1.2.4. Débits spécifiques

Les valeurs des débits spécifiques sont en majorités faibles. Elles oscillent entre 0,05 et 3,6 m³/h/m avec une moyenne de 0,61 m³/h/m (Tableau V). L'analyse des données montre que seulement un (1) forage du bassin a un débit spécifique supérieur à 1 m³/h/m. ce débit a été enregistré sur le forage ESIA/G4.

Tableau IV : Débits spécifiques des forages

Noms	Débits spécifique			
	(m ³ /h/m)	Min	Moyenne	Max
ESIA/G1	0,07			
ESIA/G2	0,24			
ESIA/G3	0,75			
ESIA/G4	3,60			
ESIA/G5	0,67			
ESIA/G6	0,43	0,05	0,61	3,60
ESIA/G7	0,09			
ESIA/G8	0,40			
ANGOF2	0,05			
YRC0765	0,62			
YRC0766	0,31			
YRC0767	0,12			

3.1.2.5. Porosité efficace et coefficient d'emménagement

La porosité efficace (n_e) (Castany, 1961) est le rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet. La porosité efficace varie de 1 à 10% sur le bassin versant du N'zi en milieu de socle (Kouassi, 2007). Ainsi, la valeur de 5% a été utilisée comme valeur initiale dans le modèle car nous n'avons pas eu le matériel nécessaire pour calculer ce paramètre.

Le coefficient d'emménagement (S_s) quant à lui, est compris entre 10^{-4} et 10^{-2} (Soro *et al.*, 2010; Tiono, 2017), respectivement sur le site expérimental de Yamoussoukro dans les granitoïdes éburnéens et sur le site expérimental de Sanon, Burkina Faso en milieu de socle. Ce paramètre est déterminé à partir des fiches d'essai de pompage. Etant donné que nous n'avons pas ces données, une valeur moyenne de 10^{-3} soit 0,1% est utilisée pour le modèle.

3.1.2.6. Epaisseurs des couches

Les épaisseurs des couches d'altérite et du socle de la zone d'Angovia ont été déterminées au niveau des forages ESIA/G1 à ESIA/G8. Ces épaisseurs varient d'un point à un autre avec une moyenne 23 m pour les altérites et 34 pour le socle.

Tableau V : Epaisseurs des altérites (m)

Codes	Epaisseurs des altérites	Min	Moyenne	Max
ESIA/G1	25			
ESIA/G2	13			
ESIA/G3	40	11	23	40
ESIA/G4	12			
ESIA/G7	11			
ESIA/G8	37			

Tableau VI : Epaisseurs du socle (m)

Codes	Epaisseurs du socle	Min	Moyenne	Max
ESIA/G1	16			
ESIA/G2	27			
ESIA/G3	40	16	34	47
ESIA/G4	28			
ESIA/G7	47			
ESIA/G8	46			

3.1.2. Maillage de la grille à différences finies

Pour la discrétisation spatiale du secteur d'étude, des mailles carrées (irréguliers) sont utilisés. Le maillage a été affiné autour des champs captant en exploitation avec une grille de 60 lignes par 60 colonnes est construite soit un total de 3600 mailles. Afin de mieux représenter les limites de la zone à modéliser, les mailles qui n'appartiennent pas à l'aquifère, ont été rendues inactives (Figure 9).

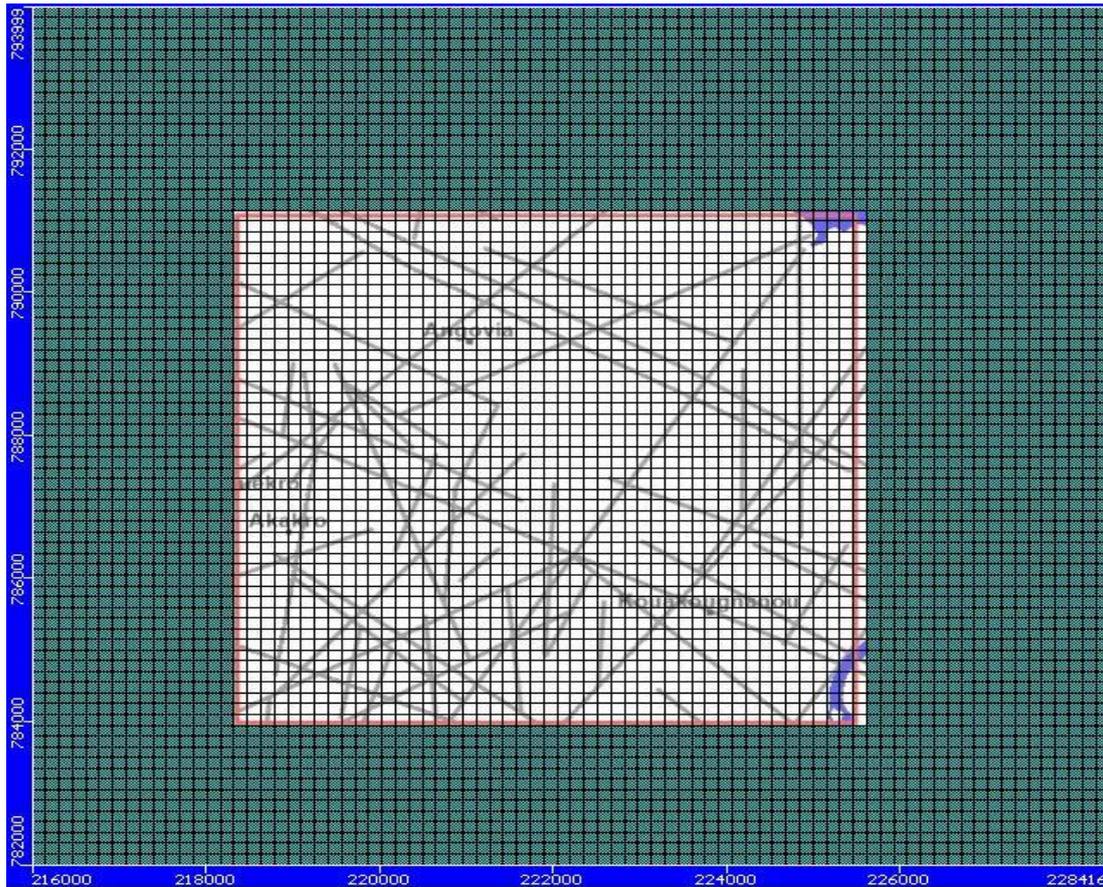


Figure 9 : Maillage du modèle

3.1.2.1. Les élévations du domaine modélisé

✓ Toit

A l'échelle de la zone, la nappe phréatique est considérée comme libre, les lentilles argileuses susceptibles de la mettre en charge sont généralement d'extension restreinte. Ainsi, la limite du toit de l'aquifère va correspondre à la surface du sol (Figure 10). Les élévations de cette surface ont été obtenue à l'aide du logiciel Google Earth et TCX Converter et l'interpolation s'est faite par krigeage dans le logiciel Surfer 17 (Golden Software Inc.), afin de minimiser le poids des valeurs disparates.

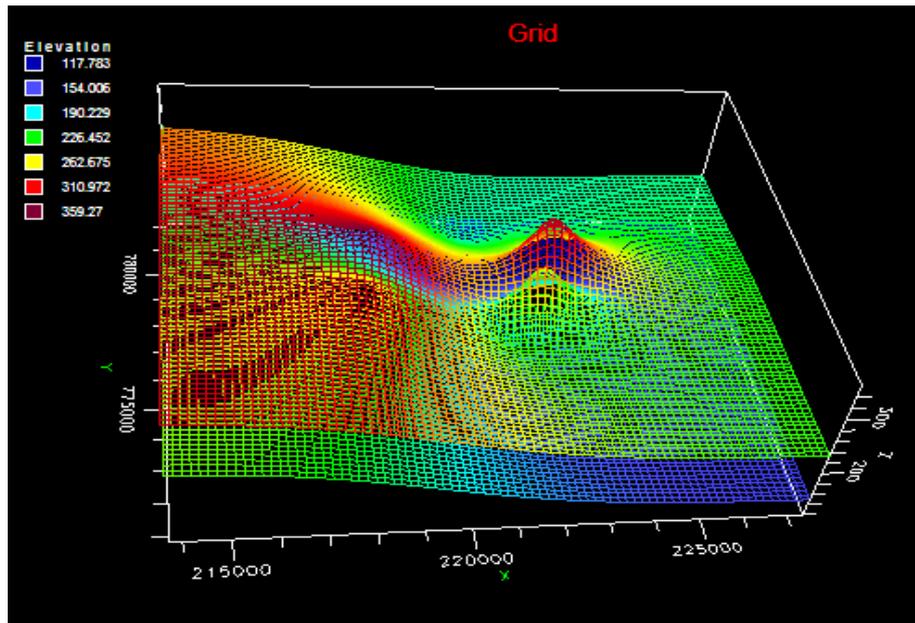


Figure 10 : Carte du toit en 3D issue d'une interpolation par krigeage

✓ **Mur**

L'aquifère de la zone d'étude repose sur le granite imperméable. Conformément aux informations synthétisées sur les logs de forage, le mur représente une limite à flux nul, sans échange par drainage avec un niveau aquifère plus profond (Figure 11). Ces informations ont également permis d'estimer une altitude maximale du mur. La cote du mur est obtenue à partir de la différence entre la cote du terrain naturel et la profondeur du toit du socle. La morphologie de cette surface a été interpolée afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle. L'interpolation a été faite par krigeage, avec le logiciel Surfer 17.

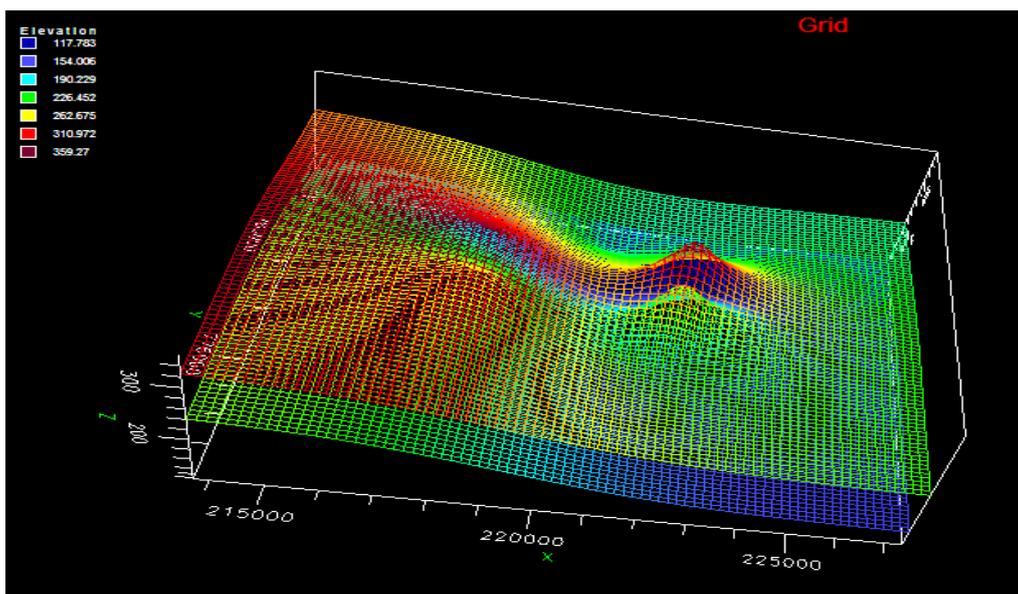


Figure 11 : Carte du mur en 3D issue d'une interpolation par krigeage

3.1.3. Simulation numérique

3.1.3.1. Calage du modèle en régime permanent

Le calage effectué en régime permanent a permis de calculer les valeurs des paramètres suivants :

✓ Calage des paramètres hydrodynamiques

Les résultats issus du calage des paramètres hydrodynamiques sont résumés dans le tableau VIII.

Tableau VII : Résultats des paramètres calés

Paramètres	Valeurs calculées	Valeurs calées
Recharge (mm/an)	46,5	36
Conductivité hydraulique (m/s)	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$4,10^{-5}$
Coefficient d'emménagement	10^{-3}	$2,10^{-3}$
Porosité efficace	0,05	0,15

L'analyse de ce tableau montre que la conductivité hydraulique moyenne calée ($3,4 \cdot 10^{-6}$ m/s) et le coefficient d'emménagement calé ($2,10^{-3}$) sont supérieurs à celles qui ont été calculées respectivement de ($4,10^{-5}$ m/s) et de ($2,10^{-3}$) sur le site. Avec l'hypothèse que la recharge se fait essentiellement à partir de l'infiltration des eaux de pluie et uniforme sur toute la surface étudiée, la recharge a été calée à 36 mm/an. Cette valeur est inférieure à celle calculé sur le terrain avec la méthode de Thornthwaite.

✓ Calage de la piézométrie

La figure 12 montre la corrélation entre les charges observées et celles calculées par le modèle.

Ainsi, le calage effectué manuellement a permis d'obtenir une bonne correspondance entre les charges observées et calculées (simulées). Le graphique présenté à la figure 12 illustre cette bonne correspondance. En effet, les points sont tous proches de la droite de la première bissectrice, excepté quelques-uns qui sont un peu éloignés. Le calcul du coefficient de corrélation (R^2) a donné 0,92 (très proche de 1). Cette valeur montre que la charge observée et celle calculée par le modèle sont très bien corrélées. Le modèle mis en place permet donc de calculer des charges proches de celles observées en réalité.

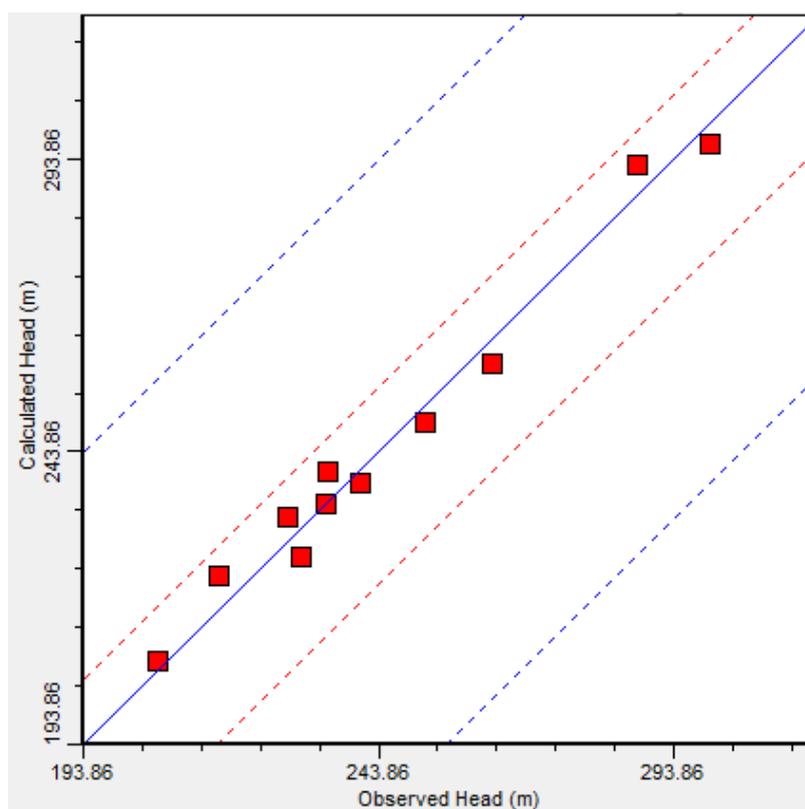


Figure 12 : Corrélation entre les valeurs observée et simulée

Tableau VIII : Statistiques sur les écarts de calcul du calage

Erreurs	Symbole	Valeurs
Moyenne des écarts (m)	\bar{R}	3,24
Moyenne de la valeur absolue des écarts	$ \bar{R} $	2,35
Ecart-type des erreurs (m)	SEE	2,56
Racine carrée de la moyenne des écarts (%)	RMS	8,7
Intervalle de confiance (%)	R^2	0,92
Racine carrée de la moyenne des écarts normalisée (%)	NRSM	7,36

Le calage du modèle a donné une erreur moyenne de 3,24 m, une erreur absolue moyenne de 2,35 m, un écart quadratique moyen de 6,36 % et un coefficient de corrélation (R^2) de 0,92 (%) (Tableau IX).

✓ **Analyse de la piézométrie**

La comparaison de l'allure de deux courbes observées et simulées au niveau de la couche d'altérites constitue déjà un moyen visuel pour évaluer la qualité de l'ajustement, quoique les erreurs commises lors des interpolations ne soient pas négligées. Dans cette optique, la

comparaison entre les piézométries observée et simulée (Figure 10), nous permet de juger de la qualité de notre calage. On constate globalement que ces deux piézométries sont superposables et présentent sensiblement les mêmes allures. Pour le ce qui concerne le sens d'écoulement de l'eau, il est pluridirectionnel. Cependant, on peut noter deux sens d'écoulement principaux à savoir : l'écoulement orienté vers l'Ouest-est et l'écoulement orienté vers le lac de Kossou situé à l'Est de la zone d'étude. Les eaux se déversent dans les différents bassins à une vitesse moyenne de $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

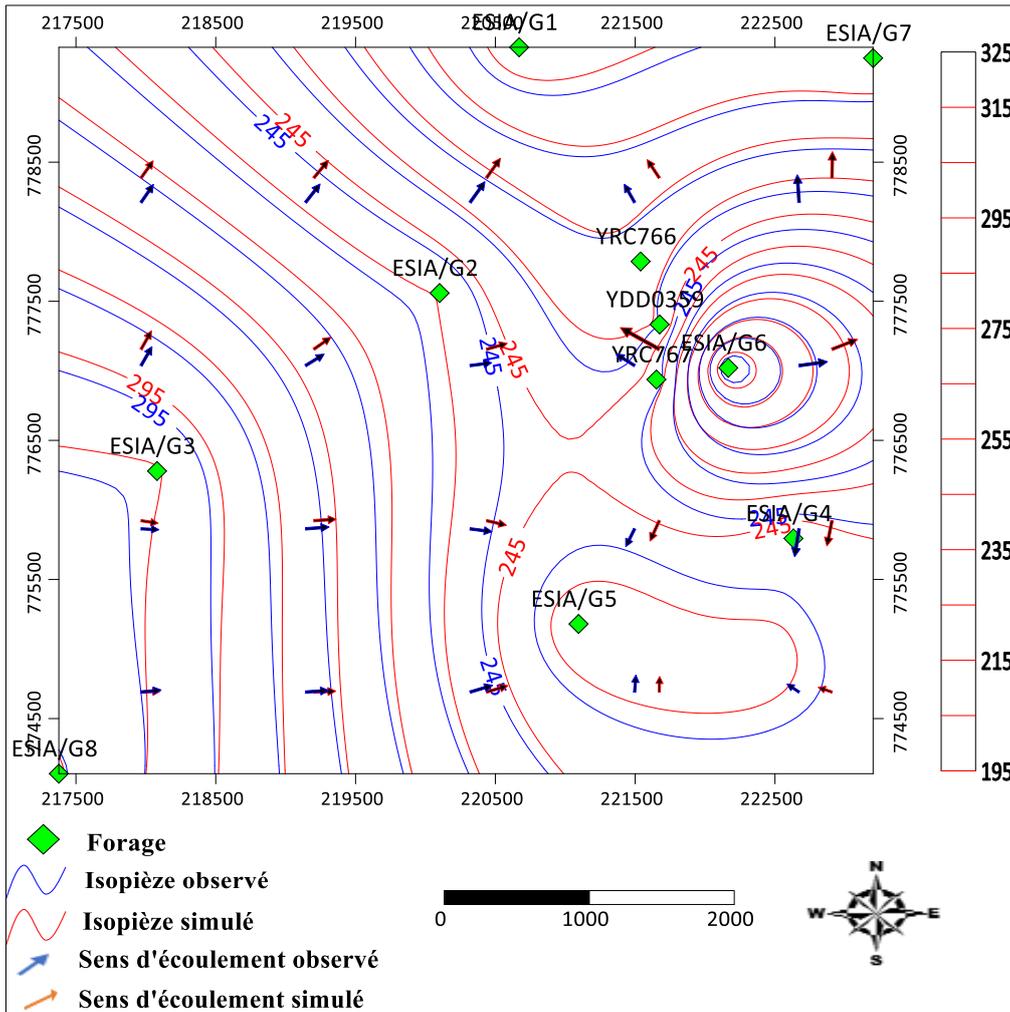


Figure 13 : Cartes d'iso-valeurs des charges mesurées et des charges simulées

3.2. Discussion

Les résultats du bilan hydrologique montrent que l'évapotranspiration réelle (ETR) est le terme le plus dominant avec une valeur de 1124 mm (soit 95,7 % des précipitations). L'importance de ce terme sur le bassin versant est due à la mise à nu des sols due à l'agriculture et à la destruction du couvert forestier Affian *et al.* (2004). Cette valeur reste sensiblement identique à celle obtenue par Kokobou (2017) dans la même zone d'étude qui est de 1045,76 mm (soit 94 % des précipitations). La lame d'eau infiltrée, qui est de 46,5 mm reste sensiblement identique à 46 mm et 53,5 mm obtenues respectivement par Biémi (1992) et Kokobou (2017) sur la Marahoué. Aussi, ont-ils obtenu sur le bassin de la Mé (Soro, 1987) et dans la région d'Odienné (Savane, 1997) respectivement, des valeurs d'infiltration de 43 mm et 77 mm. Les auteurs avancent donc des valeurs de recharges variées qui fluctuent entre 43 mm et 77 mm. Tout ceci confirme l'importance des précipitations dans la recharge, comme l'a signalé (Hughes, 2004) en Afrique du sud. Ce dernier a montré que les nappes se rechargent proportionnellement à la précipitation. Aussi, cette faible infiltration pourrait être due à la destruction du couvert forestier qui favorise l'érosion et le ruissellement rapide des eaux vers les cours d'eau (les affluents du Bandama et le lac Kossou) qui drainent la zone d'Angovia.

L'étude piézométrique a permis de réaliser deux cartes de l'année 2015 dont une en période de basses eaux et l'autre en période de hautes eaux. Ces cartes rendent compte du fonctionnement de la nappe pendant les périodes d'extrêmes eaux qui ne présentent pas de différences notables. Nous pouvons donc dire que le niveau de l'eau de la nappe de la zone est sensiblement la même pour les deux périodes. Aussi, Soro *et al.* (2007) dans leurs travaux ont expliqué que la baisse des niveaux statiques des forages serait attribuée aux déficits pluviométriques chroniques relevés en Côte d'Ivoire. De même, Maréchal *et al.* (2004) dans leurs travaux ont montré que cette baisse du niveau piézométrique est souvent due au drainage vers les cours d'eau pérennes ou autres points d'eau environnants.

Les transmissivités calculées varient entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Ces valeurs sont conformes à celles rencontrées par Baka (2012) qui varient de $1,08 \cdot 10^{-6}$ et $8,68 \cdot 10^{-4}$ m²/s dans la région d'Oumé et à celles trouvées par Ouédraogo (2016) dans le bassin du Bandama blanc lesquelles oscillent entre $2,38 \cdot 10^{-6}$ et $7,23 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Les valeurs de perméabilités issues de l'interprétation de l'essai de pompage sur chaque forage du système aquifère de la mine d'or d'Angovia sont comprises entre $1,23 \cdot 10^{-7}$ et $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$. Dans la région du N'zi-Comoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire), Kouassi *et al.* (2013) ont

obtenu des valeurs allant de $1,79.10^{-8}$ et $3,80.10^{-6}$ m/s pour une moyenne de $6,35.10^{-6}$ m/s. Les résultats de cette étude sont identiques à ceux obtenus par Kouassi *et al.* (2013) et ce malgré la divergence de méthode. En effet, cette étude a été menée à partir des valeurs de transmissivité déterminées par la méthode de Cooper-Jacob alors que Kouassi *et al.* (2013) se sont appuyés sur la méthode Hvorslev pour l'estimation de la conductivité hydraulique. La concordance de nos valeurs de transmissivités et de perméabilités avec celles de ces auteurs se justifie par le fait que ces derniers ont travaillé dans les mêmes milieux de socle que le nôtre.

Le calage du modèle d'écoulement couplé au modèle conceptuel a permis de déterminer les valeurs des paramètres hydrodynamiques supposées proches de la réalité. Ainsi, au niveau de la conductivité hydraulique, la valeur moyenne calculée sur le terrain ($3,4.10^{-6}$ m/s) est inférieure à la valeur de conductivité hydraulique calée ($4,8.10^{-6}$ m/s). Toutefois, cette valeur est représentative des argiles sableuses, puisqu'elle se situe dans la gamme 10^{-9} m/s et 10^{-5} m/s indiquée par Marsily (2004).

Pour le coefficient d'emmagasinement, les valeurs calculées sur le terrain (10^{-3}) est légèrement inférieure à celle calée ($2,10^{-3}$ m/s). Toutefois, cette valeur calée est fiable d'autant plus que les études de (Bouqdaoui *et al.*, 2009) ont montré que le coefficient d'emmagasinement des nappes d'altérite varie entre 10^{-5} et 0,21.

En ce qui concerne la recharge de la nappe, la valeur (36 mm/an) obtenue après le calage du modèle est inférieure à celle calculée (46,5 mm/an) à partir de la méthode de Thornthwaite. Cette différence de valeurs pourrait mettre en évidence la réduction des zones d'infiltration des eaux vers la nappe due à l'urbanisation galopante des villages situés dans la zone d'étude et les activités de prospection minière du site d'Angovia. Cette différence de valeurs pourrait être due également à une faiblesse de la méthode de Thornthwaite (1954), liée à la variation du seul paramètre 'température'. En effet, Yacoub (1999) a montré que la méthode de Thornthwaite (1954) surestime les valeurs de l'infiltration de 10 %.

Les valeurs de la RMS et de la NRSM obtenues à partir du modèle sont de 8.7% et 7.36%. Ces valeurs permettent d'affirmer que le calage est satisfaisant car la valeur de NRMS < 10 %. Cette valeur est proche de celle obtenue par Kamenan (2021) qui est de 8,07 % sur le bassin versant de la Lobo commune de Daloa. L'appréciation des erreurs commises lors du calage du modèle dépend de l'ordre de grandeur des charges dans la zone d'étude (Sauret, 2008). Au niveau de la zone d'Angovia, l'épaisseur totale de la nappe d'altération est importante et est de l'ordre de 23 m. Ceci permet de dire que le calage des paramètres hydrodynamiques et de la recharge a abouti à un ajustement satisfaisant des charges. Cela se

traduit, par une erreur moyenne et une erreur moyenne absolue faibles. D'après Zheng et Bennett (2002), Gurwin & Lubezynski (2004), une erreur moyenne absolue qui tend vers zéro, indique que le calage des charges est satisfaisant, mais ne précise pas si les charges simulées sont sous-estimées ou surestimées.

C'est l'erreur moyenne qui donne cette information. Dès lors, une erreur moyenne faible (3,24 m) permet de dire que les charges calculées ne sont pas surestimées. Aussi, Pak (2013) et Soro (2017), ont-ils rapporté que la faible valeur de RMS traduit les faibles erreurs commises sur les charges globales et lorsque le facteur d'erreur est égal ou inférieur à 1 %, la modélisation numérique est jugée très fiable et représentative du système étudié. Par conséquent le facteur d'erreur de 6,36 % obtenu par notre calibration est bon et montre que le modèle est fiable. Cette valeur concorde avec celle obtenue par Kouamé (2007b) qui a obtenu une valeur de 2,78 % dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire).

Conclusion partielle

La troisième partie de ce travail avait pour objectif de présenter les résultats attendus. Ainsi, grâce aux paramètres hydrodynamiques déterminés sur la zone, la conception du modèle en régime permanent est faite. Le modèle est donc calé d'une manière satisfaisante et les charges simulées sont proches de celles calculées. Le modèle a donc produit les valeurs proches de la réalité.

CONCLUSION

Pour atteindre l'objectif général de cette étude, d'abord, nous avons estimé la recharge à partir du bilan hydrologique. La valeur de l'ETR obtenue est de 1124 mm/an sur la période de 2009 à 2018 et représente la fraction la plus importante de la pluie tombée sur la zone d'étude. La lame d'eau infiltrée est de 46,5 mm en moyenne. Elle contribue faiblement à la recharge des aquifères. Le faible taux de lame d'eau infiltré montre que la zone d'étude ne renferme pas d'importantes réserves d'eaux souterraines. Aussi, l'analyse des fiches d'essai de pompages a permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques du système aquifère d'Angovia. Ainsi, les transmissivités oscillent entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s avec une moyenne de $2,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Les conductivités hydrauliques quant à elles varient entre $1,23 \cdot 10^{-7}$ et $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les débits spécifiques varient entre 0,05 et 3,6 m³/h/m et la moyenne des valeurs est de 0,61 m³/h/m. Par ailleurs, la simulation des écoulements avec le logiciel VISIAL MODFLOW nous a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la zone d'Angovia. La modélisation réalisée sur cette zone en régime permanent a permis de caler le modèle de manière satisfaisante et de montrer que le sens d'écoulement est pluridirectionnel avec pour direction principale de l'Ouest vers le Nord avec une vitesse d'écoulement moyenne de $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Enfin, Comme recommandations, il faut :

- Etablir des périmètres de protection autour des zones de recharges et de décharges des eaux souterraines de la zone d'Angovia ;
- Faire un suivi piézométrique dans les forages simultanément aux dénoyages des fosses minières ;
- Analyser fréquemment la qualité des eaux des forages et puits pour s'assurer qu'elles ne sont pas polluées.
- Auditer l'entreprise minière pour s'assurer du strict respect de l'environnement

Cette étude ouvre la voie aux perspectives suivantes :

- Faire une étude piézométrique approfondie sur une longue période pour une meilleure connaissance de la variation du niveau d'eau dans le système aquifère d'Angovia.
- Etudier la productivité du système aquifère pour améliorer l'approvisionnement en eau potable de la zone d'Angovia ;
- Utiliser un modèle d'écoulement pour une meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques suivi d'un modèle de transfert des polluants pour maîtriser le comportement des polluants issus des produits chimiques utilisées sur les sites miniers.

REFERENCES

Références

- Affian K., Anoh B.F., Djagoua V.E., Robin M., Azagoh C.M., N'guessan P., Kouamé F., Saley B.M. & Biémi J. (2004). Contribution de la télédétection à la recherche de Gisement d'or dans la région d'Angovia en Côte d'Ivoire. *Contemporary publishing International*, 4(3) : 277–288.
- Avenard J.M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf D.L.P., Guillaume T. J.-L., Adjanooun E. & Perraud A. (1971). Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Centre ORSTOM Adiopodoumé*, 50 : 161–263.
- Baka D. (2012). Géométrie, hydrodynamisme et modélisation des réservoirs fracturés du socle protérozoïque de la région d'Oumé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 246 p.
- Bamba Y. (2012). Evaluation des impacts de l'exploitation de la mine d'or de Bonikro (côte d'Ivoire) sur les ressources en eau. Mémoire pour l'obtention du Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2IE (Ouagadougou, Burkina Faso), 44 p.
- Bear J. (1972). Dynamics of fluids in porous media, Elsevier, New York, 764 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université Nationale d'Abidjan (Abidjan, Côte d'Ivoire), 479 p.
- Bouqdaoui K.E., Aachib M., Blaghen M. & Kholtei S. (2009). Modélisation de la pollution par les nitrates de la nappe de Berrechid, au Maroc. 5(1) : 99–113.
- Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université (Paris), 238 p.
- Djèbi D.D. (2015). Evaluation et Planification des ressources en eau du Bassin versant de la Marahoué (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 73 p.
- Fetter C. W. (2001). Applied hydrogeology, 4th edition, Prentice-Hall, Inc, 598 p.
- Ferrand S. & Villeneuve (2001). Intégration de la gestion des eaux souterraines dans les organismes de bassin transfrontaliers en Afrique, 176 p.
- Fondation de l'eau potable Sûre (FEPS) (2008). Exploitation minière et la pollution de l'eau, 6 p.
- Fossou N.M.R. (2010). Contribution hydrogéologique à l'étude des aquifères discontinus du département de Ferkessédougou pour une meilleure alimentation en eau potable.

Références

- Mémoire DEA, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 69 p.
- Gao, H. (2011). Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions. *Procedia Earth Planet. Sci.* 3, pp 23–28.
- Gurwin J. & Lubezynski (2004). Modeling of complex multi-aquifer systems for groundwater resources evaluation. Swidnica study case (Poland). *Hydrogeology Journal*, 12 : 627–639.
- Healy R.W. & Cook P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 101 : 91–109.
- Hughes D.A. (2004). Incorporating groundwater recharge and discharge functions into an existing monthly rainfall–runoff model/Incorporation de fonctions de recharge et de vidange superficielle de nappes au sein d'un modèle pluie-débit mensuel existant. *Hydrological Sciences Journal*, 49(2) : 311 p.
- INS (2015). Répertoire des localités Région de la Marahoue, Côte d'Ivoire, 40 p.
- Kamenan Y.M. (2021). Elaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères fissurés du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèses de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 171 P.
- Kingumbi A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de Doctorat, Université Tunis el Manar (Tunisie), 218 p.
- Koffi K. (2004). Contribution à l'étude des processus couplés hydrogéo-chimiques dans les stocks de déchets miniers : le cas du site de Carnoules (Gard, France). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 161 p.
- Koffi Y.B., Ahoussi K.E., Kouassi A.M. & Biemi J. (2014). Ressources minières, pétrolières et gazières de la Côte d'Ivoire et problématique de la pollution des ressources en eau et des inondations. *Géo-Eco-tropical*, 38(1) : 119–136.
- Koita M. (2005). Essai d'optimisation de la productivité des forages pour l'alimentation en eau potable des zones de socles : cas de Dimbokro. Mémoire DEA, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 78 p.
- Kokobou K.H.J. (2017). Evaluation des potentialités en eau souterraine du site minier d'Angovia (Région de la Marahoué, Côte d'Ivoire). Mémoire de Master, Génie de

Références

- l'Eau et de l'Environnement. UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 49 p.
- Konan O.Y.N.X. (2020). Caractérisation hydrogéologique des aquifères fissurés dans le permis d'exploitation de la mine d'or d'Angovia (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Master en Génie de l'Eau et de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 54 p.
- Kouamé K.I. (2007). Pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 205 p.
- Kouamé K.J. (2007). Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 252 p.
- Kouamé K.S.A. (2007). Mise en place et entretien des productions végétales et/ou animales : cas du cacao en Côte d'Ivoire. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur, Institut National Felix Houphouet Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 76 p.
- Kouassi A.M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minière, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Kouassi A.M., Okaingni J.C., Kouakou K.E. & Biemi J. (2013). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien : Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2(1) : 61–71.
- Kouassi K.H. (2013). Caractérisation et cartographie des zones humides littorales par l'apport des données radar polarimétriques et optiques : application aux zones de Sassandra, de Grand-Lahou et d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 150 p.
- Kouassi J.M (2018). Modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère d'altérite : cas de la ville de Daloa (Côte d'Ivoire). Mémoire de Master II, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 53 p.

Références

- Lachassagne P., Wyns R. & Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23 : 145–161.
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyse statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de Doctorat, faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, Université de Poitiers (France), 274 p.
- Maréchal J.C., Dewandel B. & Subrahmanyam K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water resources Research*, 40 : 43–71.
- Marsily G. (2004). Hydrogéologie : Comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants. Ecole des mines de Paris, 237 p.
- MINAGRI (2014). Recensement National de l'Agriculture, Côte d'Ivoire, 90 p.
- Ouédraogo M. (2016). Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la Productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR Sciences Mécaniques et Energétiques, Matériaux et Géosciences (SMEMAG), Université Paris-Saclay (Paris), 199 p.
- Pak L.T. (2013). Modélisation hydrologique distribuée des écoulements surface-souterrain à l'échelle d'un bassin versant bananier en milieu tropical volcanique (Guadeloupe, France). Thèse de Doctorat, École Doctorale des Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences et Environnement (SIBAGHE), Université Montpellier SupAgro (Montpellier France), 228 p.
- Sauret E.S.G. (2008). Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de fin d'étude de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en sciences appliquées, option géologie et sciences de l'environnement, département d'architecture, géologie, environnement et constructions, Université de Liège (ULG) (Liège, Belgique), 96 p.
- Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Cote d'Ivoire) : apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398 p.

Références

- Soro D.D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Thèse de Doctorat Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement, Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 (UPMC) - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 237 p.
- Soro G., Soro N., Ahoussi K.E., Lasm T., Kouamé F.K., Soro T.D. & Biémi J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Estudios Geológicos*, 66(2): 227–242.
- Soro N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire : bassin versant de la Mé. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 1 (Institut Dolomieu, France), 239 p.
- Soro N., Soro G., Ahoussi K.E., Saley M.B., Lasm T. & Biémi J. (2007). Caractérisation spatiotemporelle des précipitations dans le «V» Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000. *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique* : 89–108.
- Tano M.A. (2012). Crise cacaoyère et stratégies des producteurs de la sous-préfecture de Méadji au Sud-ouest ivoirien. Thèse de Doctorat, l'Université de Toulouse 2 le Mirail (Toulouse), 242 p.
- Tiono B. (2017). Elaboration d'un modèle numérique de gestion durable des eaux souterraines en milieu de socle : cas du site expérimental de Sanon, Burkina Faso. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur, 2iE (Ouagadougou, Burkina Faso), 66 p.
- Tirogo Y.J. (2016). Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, département des sciences et technologie de l'eau, de l'énergie et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 257 p.
- Yacoub I. (1999). Analyse de l'évolution quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines du grand Abidjan. DEA, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 57 p.
- Zheng C. & Bennett D.G. (2002). Applied contamination transport modelling. New York, Van Nostrand Reinhold, 621 p.

Références

Zheng C. & Bennett G.D. (1995). Applied contamination transport modelling, New York, Van Nostrand Reinhold, 440 p.

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de connaître le fonctionnement du système aquifère d'Angovia. Les données climatologiques et de forage ont permis de réaliser cette étude. Plusieurs types de méthodes ont été utilisés. Il s'agit d'abord de la méthode Thornthwaite qui a permis de déterminer la recharge. Aussi le niveau d'eau dans le système aquifère a été évalué à partir du calcul des cotes piézométriques par la méthode de Castany afin de déterminer le comportement du système aquifère. Ensuite, l'analyse des fiches d'essai de pompage ont servi à déterminer les propriétés hydrodynamiques. Et enfin, les résultats issus de l'analyse piézométrique et des propriétés hydrogéologiques ont permis de réaliser un modèle numérique et de simuler l'écoulement dans le domaine étudié. Les résultats indiquent deux axes préférentiels d'écoulement, à savoir NE-SE et CO-NE. Aussi, la présence d'un ensemble de dôme piézométrique sur l'ensemble des cartes piézométriques produites a été observée. Concernant les paramètres hydrodynamiques, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et la conductivité hydraulique ont été déterminés. L'ensemble des informations géologiques et hydrogéologiques a permis de faire une simulation numérique qui reproduit l'écoulement observé.

Mots clés : Simulation numérique, Hydrodynamique, mine d'or, Angovia, aquifère.

Abstract

The main objective of this study is to understand the functioning of the Angovia aquifer system. Satellite, climatological (rain and temperature) and drilling data (pumping test sheets and piezometric surveys) enabled this study to be carried out. Several types of methods were used. Firstly, the Thornthwaite method was used to determine recharge. Also the water level in the aquifer system was assessed by calculating piezometric ratings using the Castany method in order to determine the behaviour of the aquifer system. Subsequently, the analysis of the pumping test sheets was used to determine the hydrodynamic properties. Finally, the results of the piezometric analysis and the hydrogeological properties were used to produce a numerical model and simulate the flow in the area under study. The results indicate two preferential flow axes, namely NE-SE and CO-NE. Also, the presence of a set of piezometric dome on all the piezometric maps produced was observed. Concerning the hydrodynamic parameters, transmissivity, storage coefficient and hydraulic conductivity were determined. All the geological and hydrogeological information made it possible to carry out a numerical simulation that reproduces the observed flow.

Keywords : Numerical simulation, Hydrodynamics, gold mine, Angovia, aquifer.