



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 :
2020-2021

N° D'ORDRE : 0384/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0415003974

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**Fonctionnement hydrodynamique des
aquifères fissurés du département de Man
(Ouest de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

YAO Joseph

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. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Soutenu publiquement
le : 28/08/2021



**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 :
2020-2021

N° D'ORDRE : 0384/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0415003974

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**Fonctionnement hydrodynamique des
aquifères fissurés du département de
Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

YAO Joseph

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. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

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

Soutenu publiquement
le : 28/082021

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à :

- mon père, Feu **YAO Tanoh Daniel** qui m'a toujours encouragé à donner le meilleur de moi-même en me montrant que seul le travail saura me récompenser. Tu ne cessais de me montrer ton amour et le réconfort puis les conseils que tu me donnais ;
- ma mère, **ABOH Akalé Agnès**, pour son affection et ses prières. Tu as toujours été à mes côtés, pour me conseiller et m'aider. Puisse le Tout Puissant prolonger ta vie afin que tu bénéficies des fruits de tes efforts ;
- mes frères et sœurs pour leur soutien indéfectible, leurs conseils et leurs encouragements.

REMERCIEMENTS

Je voudrais au terme de ce travail exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui, par leur aide morale et matérielle, m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

J'adresse tout d'abord mes vifs remerciements aux autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé avec à leur tête, le Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse Koné, Présidente de ladite Université de m'avoir permis de faire mes études universitaires.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Doyen de l'UFR Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé. Merci infiniment Professeur pour vos précieux conseils et suggestions qui m'ont permis de réaliser toutes mes recherches. Je vous suis également reconnaissant de l'intérêt et de la confiance que vous m'avez témoignés durant toutes ces années.

Je tiens à remercier le Docteur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa et par ailleurs Directeur scientifique de ce mémoire, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein du laboratoire qu'il dirige. Je vous suis reconnaissant pour tous vos conseils.

Toute ma reconnaissance et mon respect vont à l'endroit de Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences, Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour sa volonté d'offrir une bonne formation aux étudiants.

Je voudrais remercier le Docteur KOUASSI Kouakou Hervé, Maître-Assistant, Responsable du parcours Master Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour ses conseils.

Je tiens aussi à exprimer ma chaleureuse reconnaissance à Docteur SORO Tanina Drissa, encadreur de ce mémoire, pour sa rigueur, sa grande disponibilité et le sérieux dans le travail.

Je traduis ma gratitude et ma reconnaissance au Docteur ANOH Kouao Armand pour ses conseils et contributions significatives à travers la lecture et la correction de ce mémoire qui l'ont considérablement amélioré.

Je n'oublie pas d'adresser mes remerciements à tous les Doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de L'Environnement (LSTE) en particulier KOUAMÉ Jean Olivier, KOFFI Bérenger pour leurs conseils, leur disponibilité et leur assistance.

Je remercie Monsieur TRAORÉ Abdoulaye pour les données qu'il m'a fournies.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis et tous les membres de la famille TANOAH qui m'ont toujours encouragé. Je pense à YAO N'da Marie Rebecca, N'GUESSAN Melissa Reine Andréa

Adjoua, COULIBALY Zana Mohamed, ADJORO Serge Arnaud, ABE Okaignin Jean François, TANAU Yao Aké Anastase et bien d'autres.

TABLE DE MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DE MATIÈRES.....	iv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ANNEXES	x
INTRODUCTION.....	1
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	3
1.1. Cadre géographique de la zone d'étude	3
1.2. Caractéristiques physiques du département	3
1.2.1. Relief.....	3
1.2.2. Sols.....	4
1.2.3. Végétation	5
1.2.4. Réseau hydrographique	5
1.2.5. Climat.....	6
1.3. Populations et activités économiques.....	7
1.4. Approvisionnement en eau potable	8
1.5. Contexte géologique et hydrogéologique.....	9
1.5.1. Géologie du département de Man	9
1.5.2. Hydrogéologie du département de Man	10
1.6. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique.....	11
1.6.1. Intérêt de la modélisation hydrogéologique	11
1.6.2. Approche de la modélisation des écoulements en milieux fracturés.....	12
1.6.3. Différentes étapes de la modélisation hydrogéologique	13
1.6.4. Méthodes de résolution de l'équation de diffusivité	13
1.7. Choix du logiciel	14
1.8. Description du logiciel FEFLOW	14

Conclusion partielle.....	15
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES	16
2.1 Matériel	16
2.1.1. Données	16
2.1.1.1. Données climatologiques	16
2.1.1.2. Données des fiches techniques de forages	16
2.1.1.3. Données cartographiques	16
2.1.2. Matériel de terrain	16
2.1.3. Outils de traitement	17
2.2. Méthodes	17
2.2.1. Estimation de la recharge des aquifères	17
2.2.1.1. Bilan hydrologique	17
2.2.1.2. Estimation de l'infiltration	18
2.2.1.3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	18
2.2.1.4. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (Exc.).....	19
2.2.2. Caractérisation du système aquifère du département	20
2.2.2.1. Élaboration de la lithologie de l'aquifère	20
2.2.2.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques	20
2.2.3. Modélisation des des écoulements souterrains du département de Man.....	24
2.2.3.1. Objectif de la modélisation	25
2.2.3.2. Élaboration du modèle conceptuel	25
2.2.3.3. Approche milieu continu discrétisé	28
2.2.3.4. Calage du modèle en régime permanent	28
Conclusion partielle.....	30
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION	31
3.1. Résultats	31
3.1.1. Estimation de la recharge	31
3.1.2. Caractérisation du système aquifère du département de Man	32

3.1.2.1. Lithologie de l'aquifère	32
3.1.2.2. Propriétés hydrodynamiques	33
3.1.3. Modélisation des écoulements souterrains du département de Man	37
3.1.3.1. Géométrie du modèle 3D des différentes couches de l'aquifère.....	37
3.1.3.2. Calage du modèle	38
3.1.3.3. Cartes piézométriques observée et simulée.....	40
3.2. Discussion	41
Conclusion partielle.....	44
CONCLUSION	45
RÉFÉRENCES.....	46

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

DTH	: Direction Territoriale de l'Hydraulique
ETP	: Évapotranspiration Potentielle
ETR	: Évapotranspiration Réelle
FEFLOW	: Finite Element subsurface FLOW system
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GPS	: Global Positioning System
HVA	: Hydraulique Villageoise Améliorée
HV	: Hydraulique Villageoise
INPHB	: Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny
INS	: Institut National de la Statistique
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
NRMS	: Normalised Root Mean Square
RFU	: Réserve Facilement Utilisable
RMS	: Root Mean Square
SIG	: Système d'Information Géographique
SODECI	: Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé
UTM	: Universal Transversal Mercator

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Bilan hydrologique du département de Man sur la période 1983-2019	32
Tableau II : Statistiques élémentaires de la transmissivité des aquifères du département de Man	34
Tableau III : Perméabilités des couches d'altérite du département de Man	35
Tableau IV : Statistiques élémentaires de la perméabilité des aquifères du département de Man	36
Tableau V : Porosités de drainage du département de Man.....	36
Tableau VI : Valeurs de vérification du calage du modèle.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du département de Man.....	3
Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du département de Man	6
Figure 3 : Diagramme ombrothermique de la station de Man de 1983 à 2019.....	7
Figure 4 : Quelques cultures pratiquées dans le département de Man	8
Figure 5 : Sources utilisées par la population pour l'alimentation en eau dans le département de Man.....	8
Figure 6 : Carte géologique du département de Man	10
Figure 7 : Schéma simplifié des aquifères sur le socle cristallin	11
Figure 8 : Matériel de terrain	17
Figure 9 : Carte des points d'échantillonnage	21
Figure 10 : Organigramme pour la conception du modèle d'écoulement.....	25
Figure 12 : Modèle du profil d'altération de 4 forages du département de Man.....	33
Figure 12 : Modèle 3D des différentes couches de l'aquifère du département de Man.....	38
Figure 13 : Diagramme des charges calculées et observées en régime permanent.....	39
Figure 14 : Corrélation des charges hydrauliques mesurées et calculées	39
Figure 15 : Cartes piézométriques des charges observées et simulées en Août 2020.....	41

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Transmissivités des aquifères du département de Man

Annexe 2 : Perméabilités des aquifères du département de Man

INTRODUCTION

Introduction

L'eau nécessaire à toute forme de vie, est un élément de promotion de la santé des individus et du développement socio-économique des collectivités humaines (Ouattara *et al.*, 2016). Ainsi, l'accessibilité à l'eau potable est l'un des objectifs majeurs des projets de développement à travers le monde. Malheureusement, sa disponibilité ne se corrèle pas toujours avec la demande. En effet, la pression sur les ressources en eau et particulièrement, les eaux souterraines est à la hausse en raison de la croissance de la population, de la dégradation de la qualité de l'eau (Mangoua *et al.*, 2019) et des changements climatiques (Yao, 2015).

En Côte d'Ivoire, de nombreux efforts ont été consentis depuis 1973 en vue de desservir les populations en eau de qualité (Youan Ta, 2008). Malheureusement, ces efforts restent confrontés à beaucoup de difficultés. En effet, le territoire ivoirien est occupé essentiellement à 97,5%, par des terrains cristallins et cristallophylliens (Jourda, 2005). La prospection de ces aquifères depuis la surface, s'avère difficile et le taux d'échec des forages implantés d'après les seules connaissances géomorphologiques et photographies aériennes reste importante. D'ailleurs, de nombreux auteurs dont Biémi (1992), Savané (1997), Jourda (2005) et Youan Ta (2008) ont montré que le champ de fracturation issu des images satellitaires fait ressortir beaucoup d'informations qui échappent à la photographie aérienne. Parallèlement à l'insuffisance de connaissance du milieu fracturé (Leblond, 1984 ; N'guessan, 1985) et de l'inefficacité de la méthode d'implantation employée, la baisse presque régulière des précipitations durant les cinquante dernières années a aggravée la demande en eau potable (Kouassi *et al.*, 2007 ; Soro *et al.*, 2007).

Le département de Man, essentiellement alimenté à partir des eaux souterraines de socle, n'échappe pas à cette réalité d'approvisionnement en eau potable. En effet, les problèmes d'eau persistent dans cette partie de la Côte d'Ivoire, car bon nombre de forages réalisés ont connu une baisse considérable de débits. Or, le développement économique rapide du département de Man et l'accroissement de la population qui s'en suit a eu pour conséquence, une augmentation drastique des besoins en eau. Cette problématique oriente les populations à se tourner vers d'autres sources notamment les rivières et les puits traditionnels réalisés dans les nappes d'altérites qui d'ailleurs ne sont pas pérennes et dont la qualité est douteuse. Selon Maréchal *et al.* (2004) et Giao *et al.* (2008), les résultats parfois insuffisants des campagnes d'hydraulique s'expliquent principalement par le manque d'études permettant de mieux caractériser le comportement hydrodynamique des aquifères de socle fracturé, étape primordiale à toute gestion durable de ces hydrosystèmes. Dès lors, la meilleure connaissance des fracturations constitue l'une des premières étapes dans la recherche des réservoirs d'eau souterraine. Cette

Introduction

démarche reste cependant subordonnée à la caractérisation du comportement hydrodynamique des aquifères de socle fracturé. C'est dans cette optique que la présente étude intitulée « **Fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)** » a été initiée. L'objectif général de cette étude est d'élaborer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés du département de Man afin de contribuer à une meilleure connaissance de leur comportement hydrodynamique.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- estimer la recharge des aquifères du département de Man ;
- caractériser le système aquifère du département de Man ;
- modéliser les écoulements souterrains du département de Man.

Ce mémoire est subdivisé en trois parties :

- la première partie porte sur les généralités qui font une description des aspects géographique, physique, socio-économique, hydrogéologique puis géologique et l'état des connaissances sur la modélisation hydrogéologique ;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail ;
- la troisième partie présente les résultats et leur discussion.

Une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus suivie des perspectives, des recommandations et des références bibliographiques met fin à cette étude.

PREMIÈRE PARTIE :
GÉNÉRALITÉS

1.1. Cadre géographique de la zone d'étude

La zone d'étude qui est le département de Man se situe à l'Ouest de la Côte d'Ivoire précisément entre 07°20' et 07°60' de longitudes Ouest et entre 07°00' et 07°40' de latitudes Nord (Figure 1). Sa superficie est évaluée à 2 265 km² pour une population estimée à 334 166 habitants (INS, 2015). Le département de Man qui appartient à la région des montagnes est limité à l'Est par les villes de Kouibly et Facobly, à l'Ouest par Danané, au Nord par Biankouma et au Sud par Bangolo. La ville de Man est le chef-lieu de région avec pour principales sous-préfectures Logoualé, Bogouiné, Fagnamplé, Gbangbegouiné-Yati, Podiagouiné, Sandougou-Soba, Sangouiné, Yapleu, Zagoué et Ziogouiné.

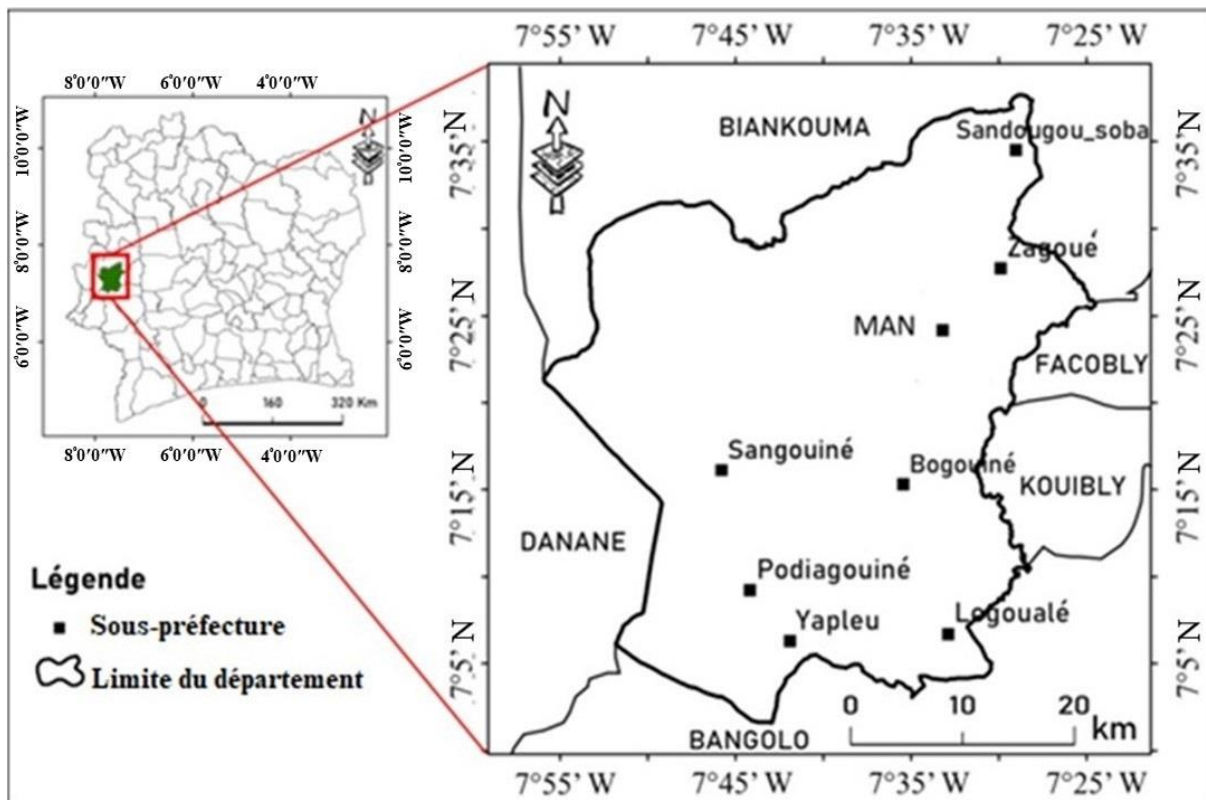


Figure 1 : Localisation du département de Man

1.2. Caractéristiques physiques du département

1.2.1. Relief

Le relief de Man se subdivise en deux ensembles de morphologie et d'extension inégale : un ensemble montagneux (chaîne des Toura et des Dan) et une zone de plateaux (Kouamé, 1999).

- ❖ Zone montagneuse

Généralités

C'est le domaine des hauts sommets où les altitudes dépassent généralement les 1 000 mètres. Ce secteur correspond au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djallon, en forme de croissant de lune dont la convexité est tournée vers le NW-SE (Kouamé, 1999).

❖ Zone des plateaux

Cette zone occupe le Sud et le Nord-ouest du secteur montagneux. L'altitude moyenne est égale à 300 m. De nombreux villages et villes sont concentrés dans ce secteur où les dénivellations sont les plus faibles.

1.2.2. Sols

Les sols du bassin versant du N'zo à Kahin sont essentiellement ferrallitiques (Perraud, 1971) et sont classés en quatre types :

- Les sols de plaines alluviales proviennent du dépôt des matériaux entraînés par les grands fleuves et leurs affluents. L'analyse du profil pédologique montre que ces sols sont très riches en sables et limons, et pauvres en argiles, cela leur confère une grande aptitude à l'infiltration des eaux.
- Les sols remaniés et rajeunis sont caractéristiques des zones de montagnes. Ils sont peu profonds et riches en sables et limons sur tout le long du profil. On note aussi à la base du profil la présence de gros blocs de roches saines et de roches altérées très irrégulièrement et superficiellement. La différence fondamentale entre ce groupe de sol et les sols de plaines alluviales réside dans la proportion de sable. En effet, le pourcentage en sables du groupe des sols rajeunis est moins important que celui des sols des plaines alluviales sur tout le profil (Perraud, 1971).
- Les sols typiques et remaniés ont des caractéristiques locales. Ils sont rencontrés essentiellement à l'Est et à l'extrême Nord du bassin versant. Ils sont peu profonds et sableux en surface. En profondeur, ils sont successivement sablo-argileux et argilo-sableux. A la différence des sols remaniés rajeunis, ils sont peu riches en éléments grossiers, et en limons à la base du profil.
- Les sols remaniés sur migmatite sont les plus répandus des sols du bassin versant du N'zo. Il est caractérisé par la présence d'un horizon d'accumulation en argiles dont le pourcentage dépasse 60% vers 1 m de profondeur. La richesse en argiles sur la quasi-totalité du profil, et la grande profondeur de ce groupe de sols réduisent considérablement sa capacité d'infiltration des eaux.

1.2.3. Végétation

Trois secteurs biogéographiques ont été déterminés : le secteur mésophile, le secteur pré-forestier et le secteur de montagne. Le secteur mésophile occupe les alentours de la ville de Man et correspond aux forêts denses. Le secteur pré-forestier correspond aux forêts claires, aux savanes boisées, aux savanes arborées, arbustives. Enfin, secteur de montagne est souligné par les forêts de montagnes herbeuses (Lasm, 2000). Les cultures pérennes sont représentées par le café et le cacao. Le développement de ces cultures au voisinage des villages entraîne la dégradation de la forêt et repousse les limites de la forêt.

1.2.4. Réseau hydrographique

Le bassin versant du Sassandra est le bassin versant de la région des montagnes. Il occupe toute la partie orientale. La majeure partie du département reste sillonnée par les affluents du Sassandra qui descendent des massifs des Dan et des Toura. Les principaux affluents du Sassandra sont le Koué et le N'zo. L'architecture de ces cours d'eau est influencée par la fracturation, mais aussi par les facteurs externes tels que la lithologie, la géomorphologie, le climat, etc. De nombreuses études ont montré une forte corrélation entre le réseau hydrographique et les accidents régionaux (Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000). Un exemple remarquable de la relation entre fracturation et réseau hydrographique est le fleuve Sassandra qui coule sur environ 300 km sur l'accident du Sassandra (Kouamé, 1999). A côté de ces cours d'eaux, on note la présence de sources d'eau naturelles. Les sources sont des résurgences d'eaux souterraines fréquentes dans la région de Man. Il existe principalement deux types de sources. Le premier type de sources bien aménagées nommées "source Débagué" existe dans les villages de Zagoué et Sandougou Soba. Et elles sont généralement sacralisées. Le deuxième type de source ne bénéficie pas d'un aménagement particulier et sont souvent tapissées de feuilles mortes. Ces dernières sources tarissent généralement en saison sèche. La figure 2 présente le réseau hydrographique du département de Man.

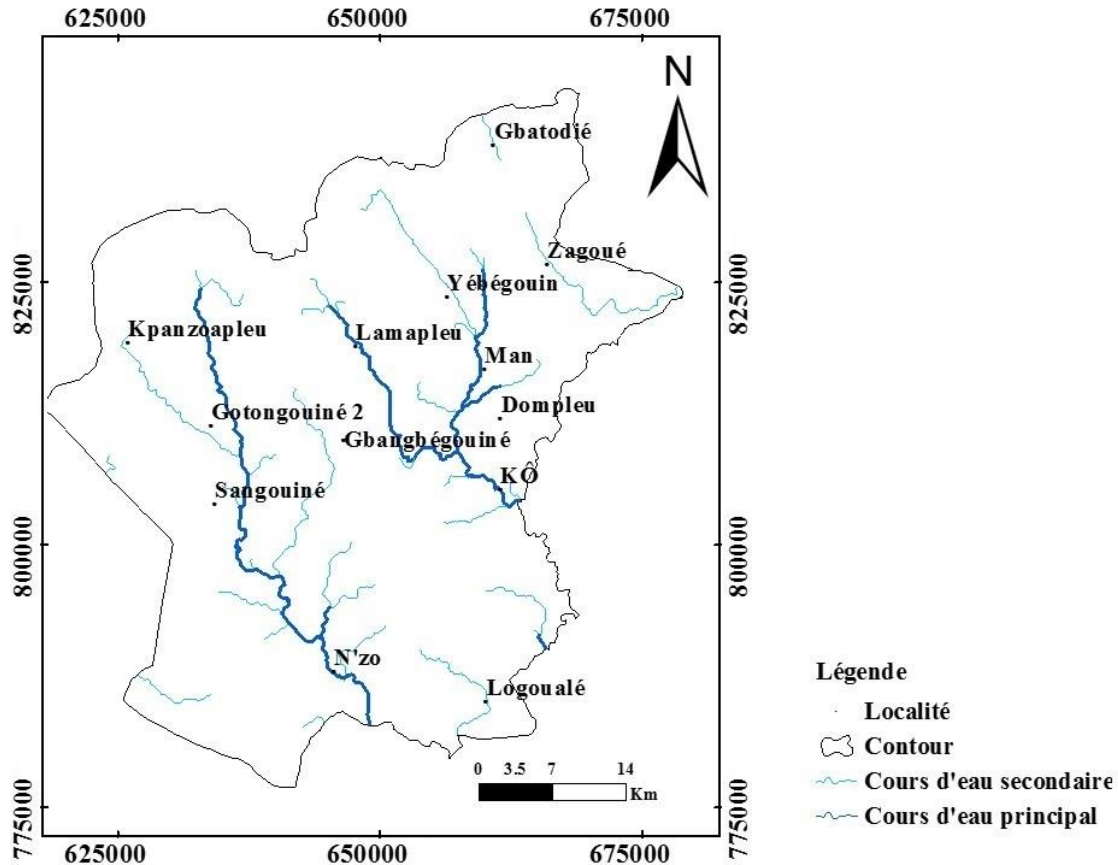


Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du département de Man

1.2.5. Climat

Le climat est considéré comme l'un des paramètres les plus importants dans l'alimentation des nappes d'eau souterraine et des eaux de surface car il conditionne la pluviométrie. Le climat rencontré dans la zone de Man est de type équatorial de transition toujours humide appelé climat de montagne (Saley, 2003). Le climat du département de Man est sous l'influence du régime de montagne caractérisé par l'abondance des précipitations avec plus de 1 587 mm de pluie en moyenne par an sur la période 1983-2019. Il est constitué globalement de deux saisons : une longue saison pluvieuse qui dure 8 mois (Mars-Octobre) et une saison sèche de 4 mois (Novembre-Février). Les précipitations atteignent un pic durant le mois d'Août (302 mm) avant de connaître une baisse considérable durant la saison sèche. Pendant la saison sèche, les précipitations moyennes mensuelles dépassent rarement 50 mm (Figure 3). Dans le département de Man, l'influence du relief sur le climat est prépondérante. Aux fortes valeurs de précipitations en saison des pluies correspondent les faibles valeurs de températures moyennes obtenues grâce à un adoucissement de l'insolation. Malgré des valeurs de pluie peu durant les mois de Décembre à Janvier, la température reste relativement faible (23,5 à 23,7 °C) à cause

du harmattan. Le harmattan soufflant dans cette période de l'année entretient une brume sèche, un ciel sans nuage et un air sec.

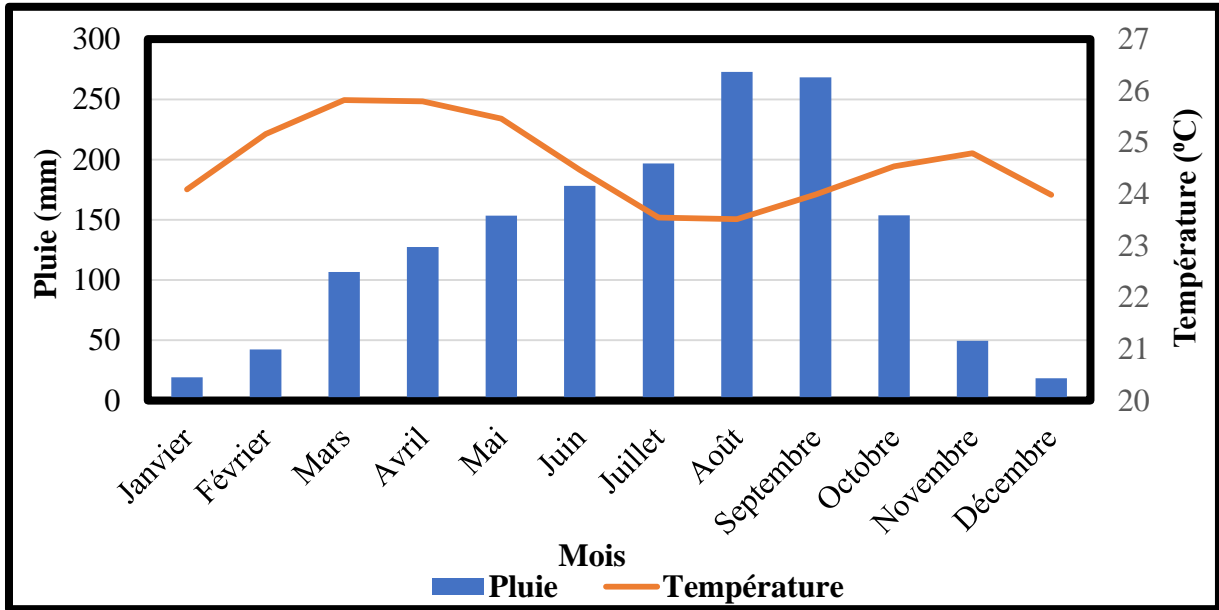


Figure 3 : Diagramme ombrothermique de la station de Man de 1983 à 2019

1.3. Populations et activités économiques

Les Dan (Yacouba et Toura) sont le groupe ethnique dominant du département de Man qui abrite également des autochtones ainsi que des allogènes (Guinéens, Maliens, Burkinabés, etc.). Les non africains constituent une population marginale. Les populations de ce département pratiquent l'agriculture comme activité principale à l'instar de tout l'Ouest du territoire ivoirien. La pêche et l'élevage sont des activités secondaires (Oularé, 2015). De façon générale, les cultures sont basées sur une association des cultures industrielles (cacao (Figure 4b), café, anacarde (Figure 4a) et hévéa) et vivrières (riz, banane, manioc, patate douce, maïs, arachide, taro, etc.) ou encore l'association de plusieurs cultures vivrières. L'élevage porte essentiellement sur les bovins et les petits ruminants (moutons et chèvres). Il n'est pratiqué que dans certaines sous-préfectures contrairement à l'agriculture qui se fait sur l'ensemble du département. La figure 4 montre quelques cultures pratiquées dans le département de Man.



Figure 4 : Quelques cultures pratiquées dans le département de Man

1.4. Approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau potable des populations du département se fait par l'exploitation des eaux souterraines et de surface (Figure 5). Les eaux de surface sont utilisées pour l'alimentation en eau potable de la ville de Man. Elles sont traitées puis distribuées par la Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire (SODECI). La capacité de production de cette société est estimée à 65 l/j/hab (Kouamé, 2011). En milieu rural, la fourniture d'eau potable est réalisée essentiellement à partir de l'exploitation des eaux souterraines. Notons cependant que, certaines localités s'alimentent à partir des eaux de surface (non traitées), des puits, des sources, etc.



Figure 5 : Sources utilisées par la population pour l'alimentation en eau dans le département de Man

1.5. Contexte géologique et hydrogéologique

1.5.1. Géologie du département de Man

Du point de vue géologique, le département de Man est situé dans le domaine libérien de la dorsale de Man. Cette dorsale se poursuit vers l'Ouest par des formations archéennes du Libéria et de la Sierra Léone. Elle est limitée dans sa partie orientale par la faille du Sassandra, frontière entre les domaines libériens et éburnéens. Cette région peut être divisée en deux vastes ensembles séparés par la faille de Man-Danané, d'orientation N 70° (Kouamelan, 1996). Au Nord, on rencontre un compartiment de nature granulite composé essentiellement de gneiss gris et de charnockites. Quant au Sud, on rencontre un compartiment de nature anatectique composé de migmatites et de quartzites à magnétite. Sur le plan lithologique, trois domaines dont le domaine granulite Nord ; le domaine granulite et magmatique intermédiaire et le domaine Sud des gneiss migmatitiques à biotite ont été identifiés par Kouamelan (1996). Selon Camil *et al.* (1984), les principales unités géologiques du département de Man et ses environs sont dans l'ordre chronologique suivant : un ensemble de gneiss gris rubané d'origine magmatique, un ensemble de quartzites à magnétites d'origine sédimentaire qui comporte diverses formations associées (diopsidites, hypersthinites, etc.) et les charnockites intrusives très développées dans le compartiment Nord. Du point de vue structurale, la faille de Sassandra, limite entre le domaine libérien et éburnéen est identifiée selon Djro (1998), comme étant une succession des phases tectoniques séparées par des périodes de "calme" relatif. La figure 6 montre la carte géologique du département de Man.

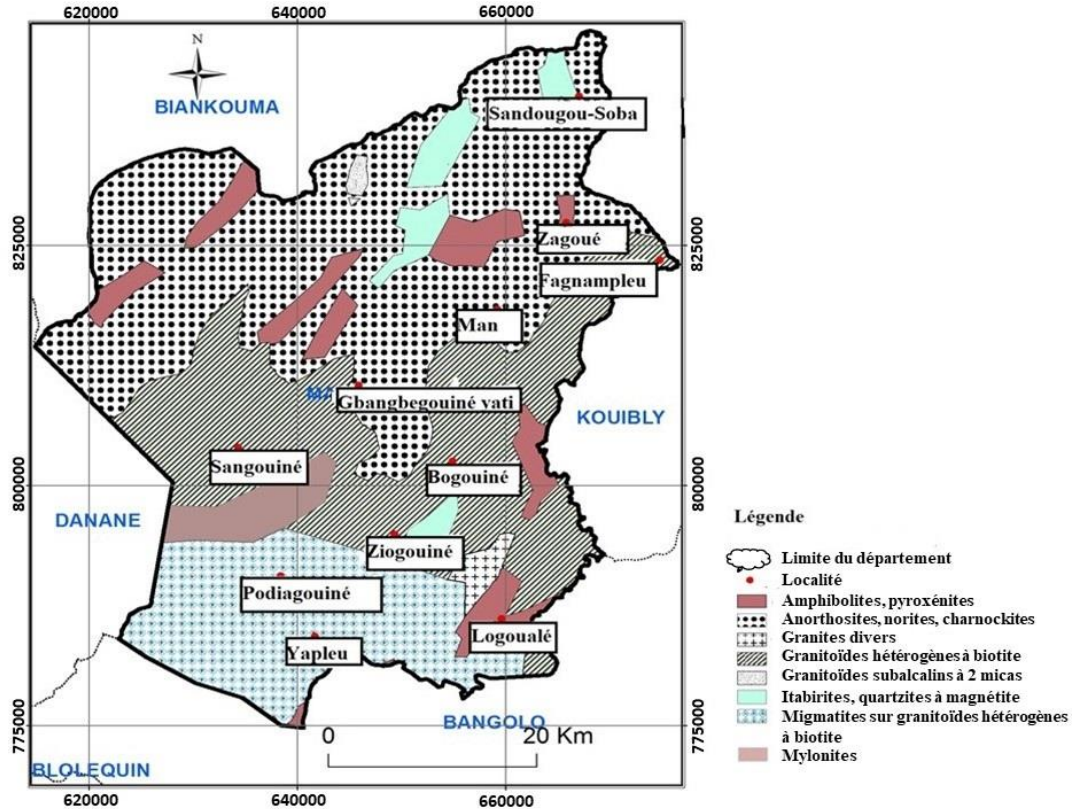


Figure 6 : Carte géologique du département de Man

1.5.2. Hydrogéologie du département de Man

En milieu de socle cristallin et cristallophyllien, les caractéristiques physiques contribuant à la caractérisation des aquifères sont bien connues. Elles portent essentiellement sur l'état d'altération des roches et/ou la présence de fractures sur ces roches (Lachassagne *et al.*, 2001 ; Maréchal *et al.*, 2004 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Lachassagne *et al.*, 2011). Le profil typique du socle permet de distinguer principalement trois couches subparallèles à la paléosurface (Wyns *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2006 ; Lachassagne *et al.*, 2011). De la surface vers la profondeur, la structure lithologique se compose comme suit : une couche latéritique riche en matériaux argileux, une couche fissurée sous-jacente caractérisée par une fissuration horizontale dense dans les premiers mètres. En profondeur, les fissures sont moins denses et une couche non fissurée, qui n'est perméable que dans les zones où les fractures profondes sont rencontrées. Sur le plan hydrogéologique, ces couches peuvent constituer des aquifères qui sont le plus souvent superposés. Les trois réservoirs décrits plus haut, fonctionnent en réalité comme un aquifère unique dont la fonction de stockage est assurée par les altérites et la fonction conductrice par les zones fissurées (Lachassagne *et al.*, 2001 ; Dewandel *et al.*, 2006). Les zones de concentration des eaux souterraines sont celles qui connectent des accidents de directions et

d'ouvertures variées et/ou des structures particulières (Kouamé *et al.*, 2009). La figure 7 est le schéma simplifié des aquifères sur le socle cristallin.

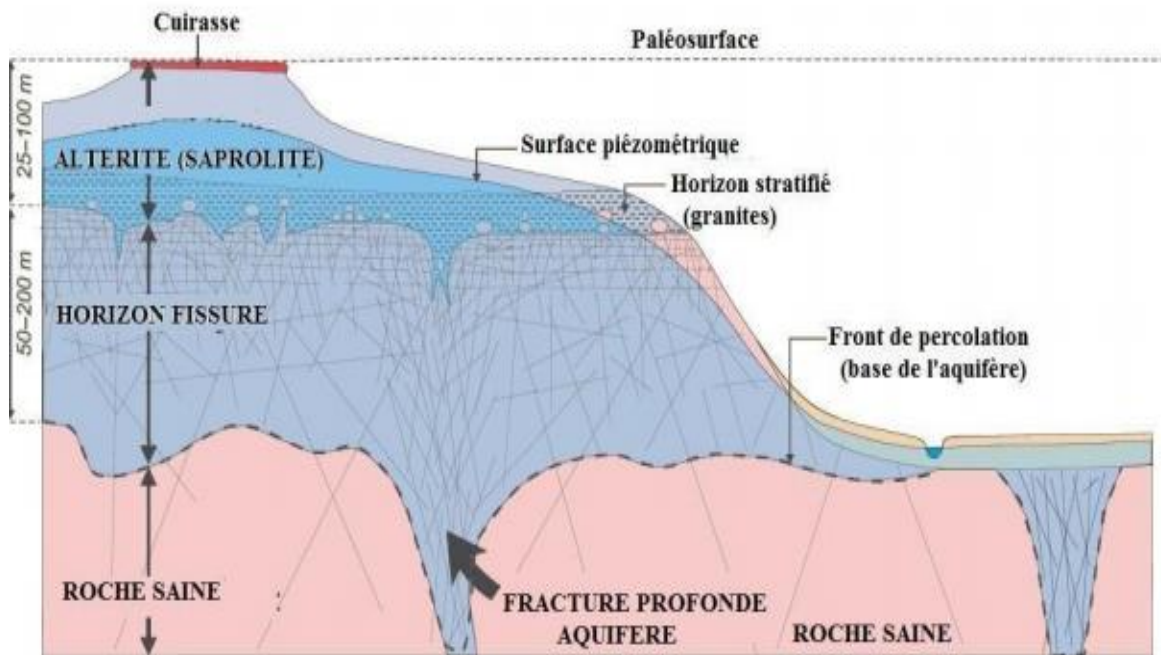


Figure 7 : Schéma simplifié des aquifères sur le socle cristallin (Lachassagne *et al.*, 2011)

1.6. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique

1.6.1. Intérêt de la modélisation 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). Selon Zheng & Bennett (1995), les modèles numériques sont utilisés lorsque les conditions aux limites sont complexes ou lorsque les valeurs des paramètres varient à l'intérieur du modèle. Dès lors, l'utilisation des modèles devient incontournable dans la gestion des ressources en eau. Aussi, permettent-ils d'intégrer des données multi-sources et de faire des analyses pouvant tenir compte de contraintes très diversifiées pour une optimisation de la gestion des eaux issues d'un aquifère (Dupont *et al.*, 1998). Le modèle numérique constitue donc une schématisation de ce système. Il permet de passer d'un système naturel complexe (le terrain) à un ensemble numérique. Il s'agit par conséquent, de deux réalités très différentes (Leduc, 2005). D'une manière générale, le modèle hydrogéologique permet :

- l'estimation des risques de contamination et le test de l'efficacité des méthodes de dépollution de sites contaminés ;
- la détermination des zones de protection des ouvrages de captage;
- la simulation du transport de contaminants de la surface vers la nappe ;
- la simulation de l'écoulement souterrain.

1.6.2. Approche de la modélisation des écoulements en milieux fracturés

Dans les milieux fracturés, l'écoulement est lié à la connectivité entre les fractures. En effet, si les fractures ne sont pas connectées ou forment de petits amas séparés, aucun écoulement n'est possible. Par contre, si les fractures sont bien connectées, le système se comporte comme un milieu continu (Koita, 2010). Il y a plusieurs approches dans la modélisation des écoulements telles que :

➤ **Modélisation en réseaux de fractures discrètes**

Dans les roches fracturées de faible perméabilité matricielle, l'écoulement est souvent très hétérogène et localisé dans quelques fractures. Dans ce cas, les théories classiques de l'hydrogéologie qui considèrent un milieu poreux équivalent sont souvent difficiles à appliquer.

➤ **Modélisation en milieu poreux hétérogène fracturé**

Le modèle milieu poreux hétérogène fracturé traite le milieu fracturé comme un milieu hétérogène incompressible (De Marsily, 2004). Chaque fracture significative est modélisée de façon explicite. Ce modèle conceptuel pour l'écoulement souterrain et le transport de contaminants représente un énorme challenge pour les hydrogéologues. Bien que conceptuellement séduisante, cette approche devient difficile à appliquer lorsque le nombre de fractures est important, même dans les zones modérément fracturées.

➤ **Modélisation en milieu double porosité**

L'approche doubles milieux continus est fréquemment utilisée en raison de la géométrie très complexe des fractures, de l'irrégularité des espacements entre fractures et du manque d'informations sur les propriétés de l'écoulement dans la fracture (Koita, 2010).

Dans la modélisation hydrodynamique des milieux à double porosité, deux approches sont généralement distinguées. Elles diffèrent par la manière dont elles décrivent l'écoulement de la matrice à la fracture. La première, classique, suppose que l'échange matrice-fracture se fait en régime pseudo-permanent (De Marsily, 2004) ; c'est-à-dire que l'échange est directement proportionnel à la différence de pression moyenne entre la matrice et la fracture. La seconde

considère une dynamique de l'échange matrice-fracture avec des termes plus transitoires (Roy, 1998).

➤ **Modélisation en milieu continu équivalent**

L'intensité de fracturation dépassant fréquemment une fracture par mètre cube, les calculs d'écoulement dans un modèle chenalisé restent limités à des domaines dont l'extension n'excède pas la centaine de mètres (De Marsily, 2004). Pour des systèmes de taille importante, la modélisation des fractures de façon explicite devient très compliquée et un milieu continu est souvent employé, représentant les propriétés hydrodynamiques globales du milieu fracturé. Cette approche est largement appliquée du fait de sa simplicité en termes de données requises et de son efficacité numérique via l'utilisation de grilles de grandes tailles et aussi du fait que l'eau est supposée s'écouler à travers tout le système (Koita, 2010).

1.6.3. Différentes étapes de la modélisation hydrogéologique

Une procédure de modélisation inclut la sélection des codes et leur vérification, la mise en place du modèle, le calage, l'analyse de sensibilité et finalement la prédiction. D'une manière générale, les étapes dans la modélisation hydrogéologique se présentent comme suit (Gao, 2011 ; Soro, 2017)

- établissement de l'objectif du modèle ;
- développement d'un modèle conceptuel du système ;
- sélection des équations d'état et du code informatique ;
- conception du modèle numérique ;
- calage du modèle ;
- validation ;
- prévision des événements futurs.

1.6.4. Méthodes de résolution de l'équation de diffusivité

La résolution de l'équation de diffusivité peut se faire par une méthode analytique ou numérique (Pinder & Celia, 2006). Pour des conditions géologiques et hydrogéologiques complexes, la méthode analytique est difficilement applicable. En effet, la complexité et l'irrégularité de la géométrie du domaine, la variabilité de certaines propriétés dans le temps et dans l'espace rendent difficile, voire impossible la résolution analytique du problème. Les méthodes numériques telles que les différences finies et les éléments finis sont celles couramment utilisées dans la résolution de l'équation de diffusivité (Anderson & Woessner, 1992 ; Roy, 1998 ; Fall, 2012). Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend en général du problème à résoudre, mais aussi de la préférence de l'utilisateur. Le choix de la méthode est fait pour

décrire le plus précisément possible le système d'écoulement. Ainsi, La méthode des différences finies est souvent préférée à celle des éléments finis pour sa simplicité.

1.7. Choix du logiciel

Le modèle doit prendre en compte, l'hétérogénéité du site constitué de plusieurs couches géologiques variables dans l'espace, les frontières du domaine avec leurs conditions aux limites, le fonctionnement hydrologique du site. L'approche, plus qualitative que quantitative permet l'utilisation d'outil commercial (progiciel) pour la modélisation du transport de polluants dans les nappes (c'est-à-dire des logiciels du commerce ayant des références opérationnelles). La sélection s'est faite suivant les fonctionnalités supportées par le code de calcul selon plusieurs critères dont : la dimension (3D), l'écoulement (au moins eau-huile, soit diphasique), l'hydrodispersion (convection, diffusion, dispersion), l'hydrochimie (adsorption, biodégradation, dissolution) et la plate-forme informatique (PC car nécessité de portabilité). Le choix s'est porté sur l'utilisation du modèle FEFLOW 7.3 développé par WASY (Allemagne) à cause de sa performance et surtout, pour la prise en compte des zones non saturée et saturée.

1.8. Description du logiciel FEFLOW

FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) a été créé en 1979, et depuis poursuit son évolution. Le code est utilisé en tant que modèle à l'usage des universités, des instituts de recherche, des organismes gouvernementaux et des bureaux d'étude.

Le logiciel FEFLOW utilisé dans ce mémoire, utilise les résolutions d'équations de l'hydrodynamique (conservations de la masse du fluide et de Darcy) par la méthode des éléments finis pour modéliser en 2D et 3D l'écoulement souterrain en milieu saturé ou non saturé en prenant en compte des phénomènes d'adsorption et de biodégradation (Diersch, 1998). La discrétisation du domaine se fait à l'aide d'un maillage triangulaire en 2D auquel s'ajoute la troisième dimension en fonction des couches hydrogéologiques. Les conditions aux limites, les paramètres hydrogéologiques ainsi que la description de la simulation de l'écoulement souterrain sont déduits de la caractérisation du site. Les interfaces de communication autorisent les données cartographiques géoréférencées ; elles sont donc compatibles avec un Modèle Numérique de Terrain et un SIG (Diersch, 1998). Les autres échanges se font suivant un protocole classique.

La démarche pour l'élaboration et l'exploitation du modèle est la suivante :

- choix des paramètres de résolution des équations ;
- discrétisation (élaboration du maillage) du domaine d'étude en fonction des paramètres géologiques et hydrogéologiques du terrain ;

Généralités

- calage de la piézométrie en fonction des pluies et des conditions aux limites par simulation hydrodynamique.

Conclusion partielle

Le département de Man, situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, possède des atouts pour son développement. La hauteur moyenne annuelle de pluie est de 1 587 mm sur la période 1983-2019. Le relief du département de Man s'étend sur une zone montagneuse dont les altitudes atteignent les 1 000 m et des plateaux dont les altitudes peuvent atteindre les 300 m. Le département de Man possède un réseau hydrographique dense constitué de cours d'eau permanents et temporaires. En ce qui concerne les concepts, il est à préciser que la modélisation hydrogéologique est indispensable à la gestion et à protection des ressources en eau souterraine. Les modèles numériques deviennent de plus en plus utilisés et incontournables dans la gestion des ressources en eau. Après cette présentation des généralités sur la zone d'étude, nous allons aborder la deuxième partie consacrée aux matériel et méthodes.

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Matériel

Le matériel se compose de données, de matériel de terrain et de logiciels de traitement.

2.1.1. Données

2.1.1.1. Données climatologiques

Les données climatologiques comprennent la pluie et la température au pas de temps mensuel. Les données pluviométriques utilisées proviennent de la station synoptique de Man et s'étendent sur la période 1983-2019. Ces données ont été fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM).

2.1.1.2. Données des fiches techniques de forages

Les données utilisées concernent principalement les données techniques des forages réalisés dans le département de Man. Au total 62 fiches techniques ont été retenues pour cette étude. Ces données de forages concernent les paramètres suivants : le débit de forage, l'épaisseur d'altération, la profondeur totale, la nature des formations géologiques sous-jacentes et les arrivées d'eau. Des données d'essai de pompage de courte durée (1 à 4 h) des forages ont été utilisées. L'ensemble de ces données provient de la Direction Territoriale de l'Hydraulique de Man (DTH).

2.1.1.3. Données cartographiques

Au cours de cette étude, deux cartes ont été utilisées. Il s'agit de la carte géologique du degré carré de Man, établie à l'échelle 1/200 000 et de la carte de fracturation.

2.1.2. Matériel de terrain

Pour les échantillons de sol, une tarière 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 National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (INPHB) pour la détermination de la porosité (Figure 8a). Une sonde piézométrique a été utilisée pour mesurer les niveaux d'eau dans les forages (Figure 8b). Un GPS a été utilisé pour relever les coordonnées géographiques des points d'échantillonnage (Figure 8c). Un infiltromètre à double anneau a permis de mesurer la perméabilité *in situ* (Figure 8d). Un appareil photo numérique a été utilisé pour faire des prises de vue sur le terrain (Figure 8e). La figure 8 présente le matériel de terrain utilisé dans cette étude.



Figure 8 : Matériel de terrain

2.1.3. Outils de traitement

Les outils de traitement de données nécessaires pour la réalisation de cette étude sont essentiellement composés de logiciels :

- le tableur Excel 2016 pour les traitements statistiques et les représentations graphiques ;
- le logiciel Surfer 13 pour la réalisation du profil d'altération et des cartes piézométriques ;
- le logiciel FEFLOW 7.3 pour la modélisation des écoulements souterrains.

2.2. Méthodes

Les données collectées ont été traitées suivant les objectifs à atteindre.

2.2.1. Estimation de la recharge des aquifères

La détermination de la recharge passe par le bilan hydrologique.

2.2.1.1. Bilan hydrologique

L'objectif du bilan hydrologique 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).

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

avec

- P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;
- R : ruissellement annuel (mm)
- ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm) ;
- I : infiltration annuelle (mm).

2.2.1.2. Estimation de l'infiltration

Au niveau d'une zone, l'excédent du bilan hydrique est partagé entre l'infiltration (I) et le ruissellement (R). Ces lames d'eau qui s'écoulent en surface alimentent les eaux de surface qui rechargent par endroit les nappes superficielles. Les précipitations qui tombent sur la zone d'étude sont partagées entre l'évaporation, l'écoulement de surface et l'infiltration, de sorte que l'équation du bilan hydrologique s'exprime par la relation suivante (Équation 2) :

$$I = P - (R + ETR) \quad (\text{Eq. 2})$$

avec :

ETR : Evapotranspiration réelle (mm) estimée selon la méthode Thornthwaite.

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la recharge. Le choix de l'une ou de plusieurs méthodes peut être guidé par la disponibilité des données, l'échelle de l'étude et la précision des résultats recherchés (Soro, 2017). Pour la détermination du bilan hydrique, nous avons choisi la méthode de Thornthwaite compte tenu des données disponibles. Les principaux paramètres recherchés sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (Exc.) ou infiltration efficace.

2.2.1.3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration a été calculée par la méthode suivante (Équation 3) :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \cdot F(\lambda) \quad (\text{Eq. 3})$$

où :

t : température moyenne de la période considérée (°C),

a : fonction complexe de l'indice I (Équation 4),

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (\text{Eq. 4})$$

avec I : indice thermique annuel (Équation 5),

$$I = \sum_{n=1}^{12} i \quad (\text{Eq. 5})$$

Chaque indice thermique mensuel est calculé suivant l'équation 6.

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{Eq. 6})$$

Le facteur correctif $F(\lambda)$ qui est fonction de la latitude du lieu considéré est donné par la table de Brochet & Gerbier (1968).

2.2.1.4. Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (Exc.)

Le bilan hydrique a été établi en suivant la méthode classique de Thornthwaite. On calcule d'abord pour chaque mois de l'année de la période considérée l'ETP. Le calcul de l'ETR et de l'excédent (Exc.) est effectué selon les équations 7, 8, 9, 10 et 11.

➤ 1er cas : Pluie mensuelle P supérieure à l'évapotranspiration potentielle ETP ($P > \text{ETP}$) alors
 $\text{ETR} = \text{ETP}$

$$\text{Si } (P - \text{ETR}) + R_{i-1} < \text{RFU} \text{ alors } R_i = (P - \text{ETR}) + R_{i-1} \text{ et l'excédent (Exc.)} = 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\text{Si } (P - \text{ETR}) + R_{i-1} \geq \text{RFU} \text{ alors } R_i = \text{RFU} \text{ et l'excédent (Exc.)} = (P - \text{ETR}) + R_{i-1} - \text{RFU} \quad (\text{Eq. 8})$$

➤ 2e cas : Pluie mensuelle P inférieure à l'évapotranspiration potentielle ETP ($P < \text{ETP}$)

$$\text{Si } R_{i-1} \geq \text{ETP} - P, \text{ alors } \text{ETR} = \text{ETP} \text{ et } R_i = R_{i-1} + (P - \text{ETR}) \text{ et l'excédent (Exc.)} = 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\text{Si } R_{i-1} < \text{ETP} - P \text{ alors } \text{ETR} = P + R_{i-1} \text{ et } R_i = 0 \text{ et l'excédent (Exc.)} = 0 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$d\text{RFU} = R_i - R_{i-1} \text{ dans les deux cas.} \quad (\text{Eq. 11})$$

où :

RFU : réserve en eau du sol facilement utilisable par les plantes (la valeur maximale est fixée ici à 100 mm compte tenu de la nature argilo-sableuse des sols). La valeur de 100 mm que nous avons retenue est une recommandation de THORNTHWAITE pour les terrains argilo-sableux. Elle peut être abaissée ou augmentée selon la nature des terrains et le type de climat,

R_i : réserve effective à la fin du mois considéré (mm),

R_{i-1} : réserve effective à la fin du mois précédent (mm),

$d\text{RFU}$: variation de la réserve au cours du mois considéré et excédent des précipitations par rapport à la mise en réserve possible (mm).

Le mois d'Août a été retenu comme le point de départ des calculs.

En raison de son relief très accidenté par rapport aux autres régions, nous retiendrons la valeur de 15 % comme valeur du coefficient de ruissellement (Lasm, 2000).

2.2.2. Caractérisation du système aquifère du département

2.2.2.1. Élaboration de la lithologie de l'aquifère

Les systèmes aquifères peuvent être représentés en système monocouche ou multicouche. L'investigation géologique a consisté à interpréter plusieurs lithologs issus de différents forages. La combinaison de ces différentes données (observations à l'affleurement, lithologs) avec les données altimétriques du toit de chaque couche composite de l'aquifère a permis la réalisation de blocs diagrammes des profils d'altération associés à chacune des formations géologiques du département.

2.2.2.2. Détermination des paramètres hydrodynamiques

- **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 : l'aquifère a une extension latérale infinie, le diamètre du puits est négligeable, le puits est parfait, l'aquifère est libre, isotrope, d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage et l'écoulement vers le puits est transitoire (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 simultanément, le niveau piézométrique de la surface de dépression s'élève. Dans ces conditions, le rabattement résiduel (S_r) obtenu, s'écrit selon les équations 12, 13 et 14.

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{4Tt}{(r)^2 S'} - \ln \frac{4Tt'}{(r)^2 S'} \right] \quad (\text{Eq. 12})$$

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 11 et 12 les expressions de S_r et T .

$$S_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Eq. 13})$$

On obtient :

$$T = \frac{0,183Q}{\alpha} \quad (\text{Eq. 14})$$

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 ou t/t' est porté en échelle logarithmique. Cette méthode permet de calculer uniquement la transmissivité.

- **Perméabilité**

- **Points d'échantillonnage**

Nous avons effectué une campagne d'échantillonnage et de mesure de la perméabilité *in situ* du 7 au 9 Décembre 2020. Cette mission a permis de collecter 16 échantillons de sol pour la détermination de la porosité et la perméabilité a été mesurée dans ces localités (Figure 9).

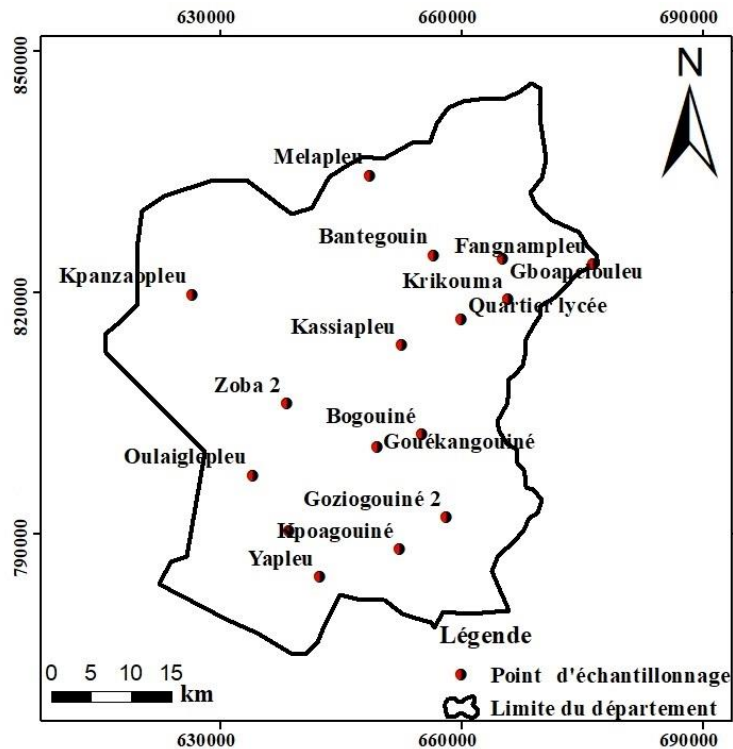


Figure 9 : Carte des points d'échantillonnage

- **Perméabilités de la couche d'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 centimètres 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 sur chaque pas de temps. Notons que durant toute la mesure, il est nécessaire de veiller à ce que les niveaux d'eau dans les deux anneaux restent les mêmes (au besoin, il faut modifier celui de l'anneau externe). On peut alors supposer 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. La valeur de cette vitesse est déduite à partir du coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy (Équation 15).

$$Q = K * S \left(\frac{H}{L} \right) \quad (\text{Eq. 15})$$

avec

Q = débit d'eau percolée (m³/s)

H = charge d'eau (m)

L = longueur de la colonne de terre (m)

S = surface de la section de la colonne d'eau (m²)

H/L : pente hydraulique

K = conductivité hydraulique ou perméabilité (m/s)

La loi de Darcy est appliquée à une colonne de sol saturée soumise à un écoulement unidimensionnel dans un milieu homogène et isotrope. Après simplification de l'équation 14, la conductivité hydraulique se déduit à travers les équations 16, 17, 18 et 19.

$$K = \frac{Q}{S} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\text{avec : } S = (2\pi * r * h) + (\pi * r^2) \quad (\text{Eq. 17})$$

$$\text{or : } Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi * r^2 * h'}{t} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\text{soit : } K = \frac{\pi * r^2 * h'}{t * (2\pi r h + \pi * r^2)} = \frac{r * h'}{t(2h+r)} \quad (\text{Eq. 19})$$

avec :

S : surface latérale + surface du fond

K : conductivité hydraulique (m/s)

S : surface d'infiltration, correspondant à la totalité des surfaces en contact avec l'eau (m²)

V : volume d'eau percolée (m³)

r : rayon du trou (m)

h' : hauteur de la lame d'eau percolée (m)

t = temps écoulé (s)

h = hauteur de la colonne d'eau (valeur initiale, en m)

➤ Perméabilités 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. Toutefois, 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 la transmissivité (T) s'exprimant en m²/s (Équation 20) :

$$T = Ke \quad \text{d'où} \quad K = \frac{T}{e} \quad (\text{Eq. 20})$$

avec :

K= perméabilité (m/s)

T= transmissivité (m²/s)

e= épaisseur mouillée (m)

• Porosité

Pour la détermination de la porosité, des échantillons de sol ont été prélevés. Une pression est exercée sur la tarière par des mouvements de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. L'outil s'enfonce progressivement dans la colonne de sol et emprisonne un échantillon qui est récupéré dans un sachet étiqueté et transporté au laboratoire. La porosité est comprise entre 0 et 1. Elle indique la quantité d'espace vide entre des particules de sol libres. La porosité efficace

correspond au rapport du volume d'eau contenue dans un matériau pouvant être libérée sous l'effet de la gravité, au volume total du milieu qui la contient (Equation 21).

$$P_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{inf}}}{V_t} \quad (\text{Eq. 21})$$

avec :

P_{eff} = porosité efficace ;

V_{inf} = volume d'eau infiltré (m^3) ;

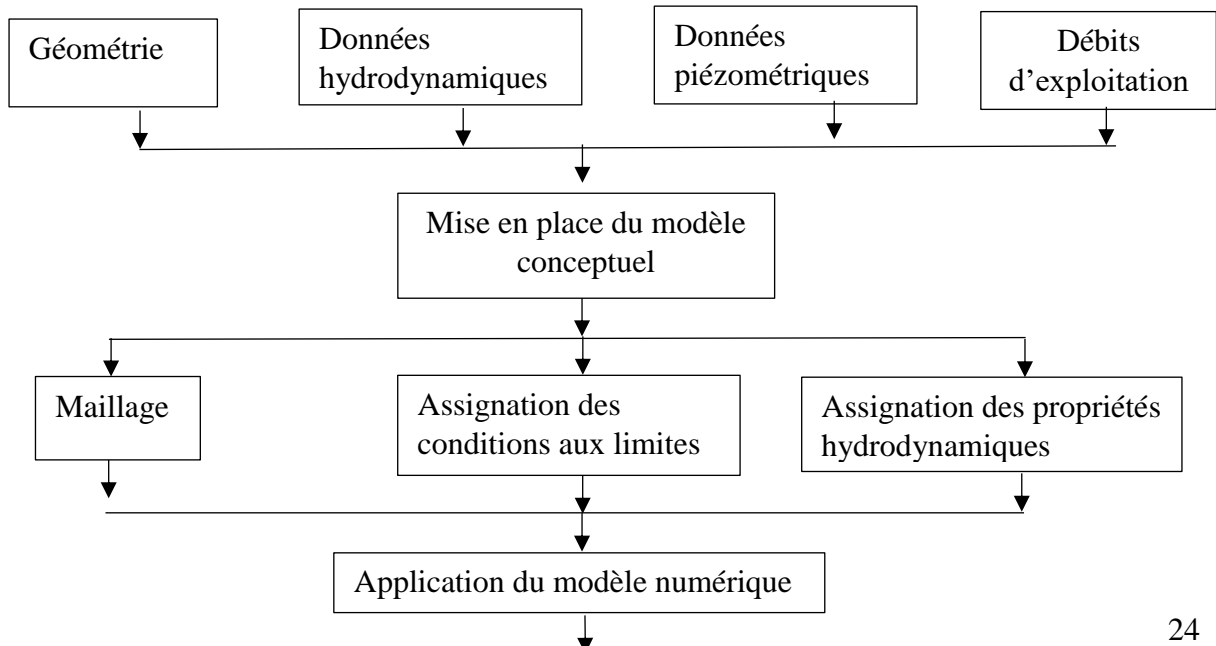
V_t = volume total (m^3).

2.2.3. Modélisation des des écoulements souterrains du département de Man

La modélisation commence par l'acquisition des données que sont les conditions aux limites, les paramètres hydrodynamiques et la recharge qui facilitent le calibrage du modèle. Les données acquises permettent de mettre en place un modèle conceptuel qui est introduit dans un logiciel pour concevoir le modèle numérique. La réalisation d'un modèle numérique suit les étapes suivantes (Anderson & Woessner, 1992) :

- détermination des objectifs à atteindre ;
- développement du modèle conceptuel ;
- choix du logiciel utilisé ;
- élaboration du modèle numérique ;
- calage du modèle numérique ;
- analyse critique des résultats obtenus.

Le modèle est une schématisation numérique du système hydrodynamique. L'organigramme de la figure 10 décrit la méthodologie utilisée.



Calage du modèle numérique

Figure 10 : Organigramme pour la conception du modèle d'écoulement

2.2.3.1. Objectif de la modélisation

La présente étude vise à mettre en place un modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés. De manière spécifique, l'objectif visé est de simuler les écoulements souterrains des eaux souterraines du département de Man à partir de la modélisation hydrogéologique. De ce fait, cet essai de modélisation ne sera réalisé qu'en régime permanent qui permet d'atteindre l'objectif visé.

2.2.3.2. Élaboration du modèle conceptuel

La modélisation numérique des systèmes hydrogéologiques est une tâche complexe basée sur des hypothèses. Afin d'obtenir des résultats numériques s'approchant des conditions réelles observées sur le terrain, l'approche conceptuelle proposée est celle du milieu continu discrétisé. Avant d'effectuer la simulation de l'écoulement, le modèle a été créé en assignant les données. La création du modèle nécessite dans un premier temps de définir la nature des unités stratigraphiques, leur confinement éventuel, la hauteur du toit et du mur de chaque couche et la charge hydraulique initiale. Ensuite, de fixer les conditions aux limites, de subdiviser ces couches en mailles enfin de spécifier les paramètres hydrogéologiques.

• Principales hypothèses

Etant donné la complexité des conditions qui contrôlent le mouvement des eaux souterraines dans l'aquifère, des hypothèses simplificatrices sont faites pour la construction des modèles numériques qui simulent l'écoulement des eaux souterraines (Robinson & Ipsen, 2007). Les hypothèses suivantes ont permis de concevoir et de mettre en œuvre le modèle :

- l'aquifère est considéré comme libre dans son ensemble ;
- les couches constituant l'aquifère sont isotropes ;
- la recharge est considérée comme uniforme ;
- les débits de pompage sont considérés constants dans le temps.

• Géométrie du modèle

Dans cette étude, le domaine hydrogéologique modélisé a trois couches qui sont (Figure 11) :

- une couche d'altérite ou altérite sablo-argileuse. Le toit de cette couche constitue la surface topographique ;

- une couche de sable grossier argileux ou d'arène granitique. Son sommet est la base de la couche d'altérite sus-jacente et sa base constitue le toit du socle sain ;
- un socle sain. Son épaisseur est fixée de façon arbitraire à 200 m compte tenu de son caractère infini, la roche saine étant considérée comme imperméable.

- **Conditions aux limites du modèle**

Les limites latérales du modèle sont des limites à charges imposées. De ce fait, des charges ont été imposées aux frontières du domaine à modéliser sur la base de la carte piézométrique des hautes eaux (Août 2020). La rivière correspond à une limite de troisième type ou condition de Cauchy. Il s'agit d'un potentiel imposé sur la rivière et d'un facteur de colmatage du lit de la rivière (coefficient de transfert) qui expriment la relation de flux qui existe entre la rivière et l'aquifère. Cette condition revient à une condition du premier type (potentiel imposé) dès lors que le lit de la rivière n'est pas colmaté. Au niveau de la rivière, le potentiel hydraulique varie de façon linéaire. Sa variation est obtenue à partir de l'interpolation 1D des côtes du plan d'eau mesurées en différents endroits de la rivière.

- **Caractérisation de la piézométrie**

La résolution de l'équation de diffusivité fournit un champ de potentiels qui permet d'établir une carte que l'on appellera "piézométrie calculée". Celle-ci sera confrontée à une carte piézométrique de référence (ou piézométrie mesurée), et lorsque les deux cartes ne sont pas concordantes, cette confirmation aboutit à la révision du modèle Kouamé (2017). L'établissement de la carte piézométrique de référence fait appel à l'hypothèse selon laquelle les niveaux piézométriques mesurés sont représentatifs de la surface piézométrique aux environs du point considéré.

- **Paramètres dynamiques de l'écoulement**

La modélisation étant en régime permanent, les entrées et les sorties du modèle sont toujours les mêmes. Le bilan de masse est équilibré. Les paramètres dynamiques de l'écoulement qui peuvent intervenir dans les échanges de flux entre le modèle et ses limites, et qui contrôlent le bilan de masse sont :

- **Recharge**

Elle correspond essentiellement à l'infiltration et constitue le paramètre le plus important.

- **Prélèvements**

Ils correspondent à la quantité d'eau prélevée pour l'alimentation en eau potable des populations.

- **Flux d'entrée et de sortie à travers la rivière**

L'aquifère associé à la zone d'étude n'est pas un système hydrogéologique clos. Dans cette zone hydrogéologique, les rivières N'zo et Kô sont constituées d'un flux entrant au nord. Le drainage de l'aquifère se fait durant toute sa traversée de cette zone et a pour conséquence un flux sortant au sud de la zone (exutoire hydrogéologique) plus important que le flux entrant au nord.

• **Paramètres hydrodynamiques**

En régime permanent, la conductivité hydraulique demeure le principal paramètre de l'aquifère qui va avoir une influence sur le champ de potentiel hydraulique et les écoulements. L'anisotropie de la conductivité hydraulique de l'aquifère n'a pas pu être prise en compte dans la détermination du système d'écoulement souterrain en utilisant les données d'essais de pompages issus des campagnes d'hydraulique villageoise, en raison du temps de pompage très court. Par conséquent, les composantes de la conductivité hydraulique suivant les trois (3) directions (x, y, z) de l'espace sont supposées identiques dans les différentes couches de l'aquifère. Dans cette approche, les fractures régionales sont introduites dans la troisième couche de manière discrète. Les conductivités hydrauliques des fractures sont ensuite spécifiées en fonction de la nature géologique de la formation dans laquelle elles se trouvent.

➤ **Modèle numérique**

Le modèle numérique d'écoulement est développé avec le logiciel FEFLOW 7.3 (Finite Element subsurface FLOW system). C'est un logiciel interactif de modélisation de l'écoulement, du transport de masse (transport réactif avec plusieurs espèces) et de chaleur dans les aquifères variablement saturés, en régime permanent ou transitoire.

➤ **Discrétisation spatiale**

Avec le logiciel FEFLOW, la construction du modèle débute par la génération de super-maillages au sein du domaine afin de délimiter les limites extérieures du modèle. Cette génération prend en compte les caractéristiques géométriques de la zone modélisée telles que le contour du bassin, les fractures, le cours d'eau et les points d'observation qui sont pris en compte par la création des mailles à éléments finis. Ces différentes caractéristiques géométriques citées sont

utilisées aussi dans l'affectation des conditions aux limites. Les super-maïlles ont trois types de formes qui sont les polygones, les lignes et les points.

➤ **Simulation numérique**

Une fois l'application du modèle numérique spécifiée, les différentes conditions aux limites et les propriétés hydrodynamiques des différentes couches sont attribuées.

2.2.3.3. Approche milieu continu discrétisé

Une fois spécifiées, les différentes conditions aux limites et les propriétés hydrodynamiques des différentes couches sont attribuées. La simulation est basée sur l'approche milieu continu discrétisé et isotrope. Les fractures régionales verticales 2D sont introduites dans la troisième couche (socle) sur la base des accidents majeurs identifiés. Les valeurs de conductivité hydraulique attribuées aux accidents majeurs sont les moyennes (géométriques) de conductivité hydraulique associées aux forages qui captent ces accidents majeurs suivant les domaines géologiques. La conductivité hydraulique de la troisième couche (socle) est arbitrairement fixée à $K = 10^{-9}$ m/s.

2.2.3.4. 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 calculées par le modèle. Ce processus « d'essai/erreur » s'est déroulé comme suit :

- ajustement de la conductivité hydraulique et/ou de la recharge ;
- ajustement des conditions aux limites ;
- simulation du modèle ;
- comparaison des valeurs de charges hydrauliques calculées à celles observées ou mesurées.

Si les écarts sont grands alors le processus sera repris.

Cette procédure est exécutée jusqu'à ce que les écarts entre les valeurs de terrain et celles calculées par le logiciel soient faibles (Anderson & Woessner, 1992). Dans le code FEFLOW, ce sont l'écart-type des erreurs (σ), la moyenne des écarts absolus (\bar{E}), la racine carrée de la moyenne des carrés et la racine carrée de la moyenne des carrés normalisés des charges hydrauliques qui permettent d'apprécier le calage. Les équations 22 à 27 décrivent respectivement ces valeurs de calage d'après Ghanbarian-Alavijeh *et al.* (2010). Il procède comme suit :

$$\bar{E} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |E_i| \quad (\text{Eq. 22})$$

avec :

\bar{E} [m] : Moyenne des écarts absolus

m : Nombre de forage

E_i : Ecart de calage entre les valeurs de piézométrie mesurées (H_{obs}) sur le terrain et celles calculées (H_{cal}) par le logiciel :

$$E_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (H_{\text{cal}} - H_{\text{obs}})_i \quad (\text{Eq. 23})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (E_i - \bar{E})^2}{m}} \quad (\text{Eq. 24})$$

où : σ [m] : Ecart-type des erreurs

$$RMS = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m E^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

EQM : Ecart quadratique moyen

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - \bar{X})^2} \quad (\text{Eq. 26})$$

\bar{X} : Moyenne des carrés des écarts

n : Nombre de points

x : Différences entre charges observées et simulées

RMS : Racine carrée de la moyenne des carrés

$$NRMS = \frac{RMS}{(H_{\text{obs}})_{\text{max}} - (H_{\text{obs}})_{\text{min}}} \quad (\text{Eq. 27})$$

avec :

NRMS [%] : racine carrée de la moyenne des carrés normalisés

$(H_{\text{obs}})_{\text{max}}$ et $(H_{\text{obs}})_{\text{min}}$ représentent respectivement les valeurs maximales et minimales de piézométrie mesurée sur le terrain.

Matériel et méthodes

D'après Leblanc (1999), la racine carrée de la moyenne des carrés normalisés (NRMS) permet d'apprécier le calage et sa valeur doit être inférieure à 10 % pour que le modèle soit considéré comme calé.

Conclusion partielle

La deuxième partie a permis de présenter le matériel et les méthodes utilisés dans cette étude. L'application de la méthode numérique a contribué à la simulation des écoulements souterrains. Le modèle numérique considère la direction de l'écoulement par rapport à l'ouvrage en tenant compte du gradient hydraulique. L'ensemble du matériel et des méthodes a permis d'obtenir des résultats et leur discussion qui font l'objet de la troisième partie de ce travail.

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

Les résultats qui sont présentés dans cette partie se focalisent sur l'estimation de la recharge, la caractérisation du système aquifère et la réalisation d'un modèle hydrogéologique du département de Man.

3.1.1. Estimation de la recharge

Le bilan hydrique a été établi à la station de Man de 1983 à 2019. La pluviométrie moyenne annuelle du département de Man vaut 1 587 mm sur la période 1983-2019. Les pertes par évapotranspiration potentielle sont estimées à 1 315,6 mm.an⁻¹ (Tableau I). Ces pertes représentent globalement 82,90 % des précipitations. Ces résultats supposent que les potentialités en eau de surface qui en découlent sont relativement peu abondantes. En effet, les écoulements de surface sont estimés à 238,05 mm.an⁻¹ soit 15 % des précipitations moyennes du bassin. L'infiltration totale qui contribue à la recharge des nappes est de l'ordre de 244,5 mm.an⁻¹. Cette lame d'eau représente environ 15,41 % de la pluie.

Tableau I : Bilan hydrologique du département de Man sur la période 1983-2019

	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)
Janvier	19,2	102,36	19,2
Février	42,3	106,96	42,3
Mars	106,8	128,45	106,8
Avril	127,5	126,79	126,79
Mai	153,4	126,52	126,52
Juin	178,2	108,53	108,53
Juillet	196,8	99,02	99,02
Août	272,8	97,70	97,70
Septembre	268,2	100,12	100,12
Octobre	153,6	109,47	109,47
Novembre	49,7	108,74	108,74
Décembre	18,6	100,97	59,5
Total	1 587	1 315,6	1 104,7
R (mm)		238,05	
I (mm)		244,5	

3.1.2. Caractérisation du système aquifère du département de Man

3.1.2.1. Lithologie de l'aquifère

L'analyse du modèle du profil d'altération de la figure 12 montre globalement une homogénéité entre les différents profils. Cependant, trois horizons bien distincts se dégagent de ces profils. Ainsi, le sol végétal ou la cuirasse latéritique par endroit constituent l'horizon superficiel

identifié. Hormis cette couche superficielle, du sommet à la base, la structure lithologique du département se compose comme suit :

- une couche d'argile latéritique ou sablo-argileuse. Cette couche a une épaisseur maximale de 20 m et une épaisseur minimale de 9,4 m ;
- une couche fissurée qui est intermédiaire entre le socle sain et la couche d'altérite et au niveau de laquelle les arrivées d'eau sont observées au cours de la foration. L'épaisseur maximale de cette couche fissurée est égale à 56,6 m et une épaisseur minimale égale à 35,9 m ;
- un socle sain qui se trouve à la base du profil d'altération constitue le substratum. L'épaisseur de la couche fissurée est forte au niveau de Sokourala (56,6 m) et faible à Melapleu (35,9 m).

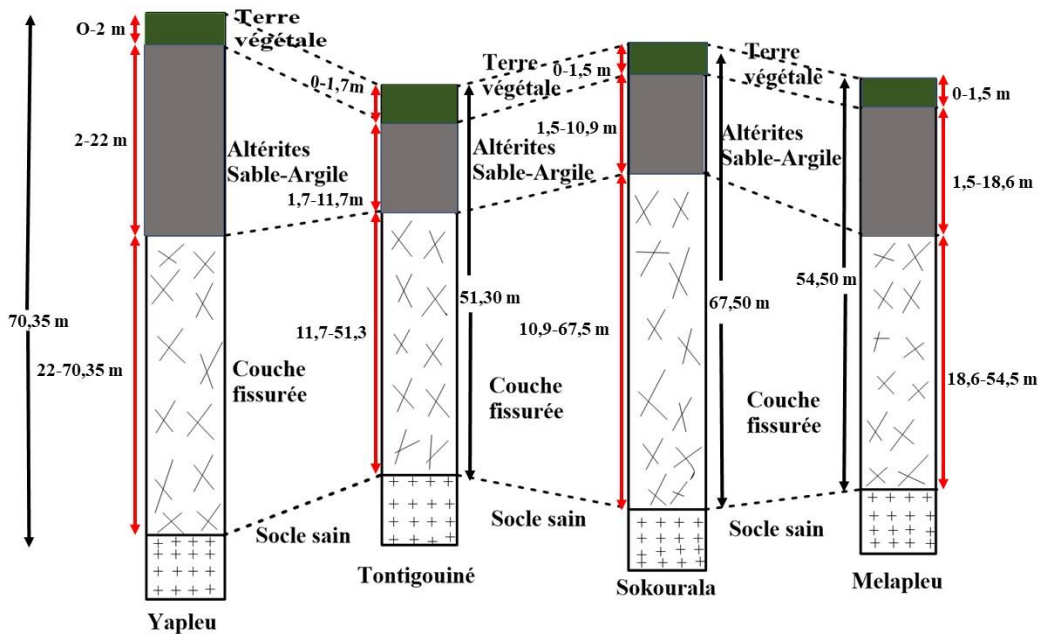


Figure 11 : Modèle du profil d'altération de 4 forages du département de Man

3.1.2.2. Propriétés hydrodynamiques

❖ Transmissivité

L'annexe 1 présente les transmissivités des aquifères du département de Man. Les valeurs de transmissivité ont été déterminées pour 62 forages repartis sur l'ensemble du département de Man. Le tableau II présente les statistiques élémentaires de la transmissivité des aquifères du département de Man. Elles sont comprises entre $2,03 \cdot 10^{-6}$ et $1,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. L'écart type ($1,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) et le coefficient de variation (106 %) montrent l'état de dispersion des valeurs de transmissivité autour de la valeur moyenne.

Résultats et discussion

Les classes de transmissivité sont de 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6} . Mais la classe la plus prépondérante est 10^{-5} et elle représente 48,44 % de l'effectif total des ouvrages.

Tableau II : Statistiques élémentaires de la transmissivité des aquifères du département de Man

Paramètre	Valeur
Minimum (m ² /s)	$2,03.10^{-6}$
Maximum (m ² /s)	$1,94.10^{-3}$
Moyenne (m ² /s)	$1,15.10^{-4}$
Écart-type (m ² /s)	$1,08.10^{-4}$
Coefficient de variation (%)	106

❖ Perméabilité

✓ Perméabilité des couches d'altérites

Le tableau III résume les perméabilités des couches d'altérites du département de Man. Elles varient entre $2,77.10^{-6}$ et $2,22.10^{-5}$ m/s, avec une moyenne de $1,35.10^{-5}$ m/s et un écart-type de $5,96.10^{-6}$ m/s. La plus forte valeur de perméabilité est observée au quartier lycée ($2,22.10^{-5}$ m/s) tandis que la plus faible valeur $2,77.10^{-6}$ m/s est observée dans la localité de Bogouiné.

Tableau III : Perméabilités des couches d'altérite du département de Man

Localité	Perméabilité (m/s)	Moyenne (m/s)	Ecart-type (m/s)
Bogouiné	$2,77.10^{-6}$	$1,35.10^{-5}$	$5,96.10^{-6}$
Gouékangouiné	$1,15.10^{-5}$		
Goziogouiné 2	$1,12.10^{-5}$		
Kpaogouiné	$2,84.10^{-6}$		
Yapleu	$1,11.10^{-5}$		
Podiagouiné	$1,88.10^{-5}$		
Oulaiglepleu	$1,07.10^{-5}$		
Kassiapleu	$8,37.10^{-6}$		
Zoba	$1,53.10^{-5}$		
Kpanzouapleu	$1,22.10^{-5}$		
Mélapleu	$1,95.10^{-5}$		
Bantégouin	$9,55.10^{-6}$		
Krikouman	$1,84.10^{-5}$		
Fangnanpleu	$2,14.10^{-5}$		
Gboapeulouleu	$1,99.10^{-5}$		
Quartier lycée (Man)	$2,22.10^{-5}$		

✓ **Perméabilité des aquifères**

L'annexe 2 présente les perméabilités des aquifères du département de Man. Le tableau IV montre que les perméabilités des aquifères calculées varient de $3,57.10^{-8}$ à $2,96.10^{-5}$ m/s pour une moyenne de $3,02.10^{-6}$ m/s et un écart-type de $2,80.10^{-5}$ m/s avec un coefficient de variation de 107 %. Le coefficient de variation supérieur à 100 % traduit une dispersion des valeurs et montre que le milieu est hétérogène.

Tableau IV : Statistiques élémentaires de la perméabilité des aquifères du département de Man

Paramètre	Valeur
Minimum (m/s)	$3,57.10^{-8}$
Maximum (m/s)	$2,96.10^{-5}$
Moyenne (m/s)	$3,02.10^{-6}$
Écart-type (m/s)	$2,80.10^{-5}$
Coefficient de variation (%)	107

❖ Porosité

Le tableau V présente les résultats des porosités de drainage du département de Man. Ces valeurs de porosités efficaces sont comprises entre 3 % et 23,33 % avec une moyenne de 9,65 %. De façon générale, ces porosités sont faibles. La plus faible a été observée dans la localité de Kassiapleu avec un pourcentage de 3 et la plus forte à Kpaogouiné avec 23,33 %. L'écart-type est de 5,70 %.

Tableau V : Porosités de drainage du département de Man

Localité	Porosité (%)	Moyenne (%)	Ecart-type (%)
Bogouiné	7	9,65	5,70
Gouékangouiné	6,89		
Goziogouiné 2	18		
Kpaogouiné	23,33		
Yapleu	13,67		
Podiagouiné	12		
Oulaiglepleu	4,85		
Kassiapleu	3		
Zoba 2	16,80		
Kpanzoapleu	5		

Mélapleu	10,67		
Bantégouin	3,33		
Krikouma	4,20		
Fangnanpleu	7		
Gboapeulouleu	11,40		
Quartier lycée (Man)	7,33		

3.1.3. Modélisation des écoulements souterrains du département de Man

3.1.3.1. Géométrie du modèle 3D des différentes couches de l'aquifère

La géométrie et la dimension du modèle sont deux des aspects à définir pour conceptualiser le modèle. Sur la base des constats et des résultats obtenus, nous avons considéré une structuration de l'aquifère suivant 3 couches dont les limites supérieures (toit) et inférieures (mur) ont été construites à partir des lithologs. L'épaisseur de chaque couche n'est pas uniforme à l'échelle du bassin versant mais varie en fonction de la topographie. Ainsi, nous avons :

- ✓ **Une couche de saprolite.** Le toit de cette couche constitue la surface topographique et sa base correspond au toit de la couche fissurée sous-jacente ;
- ✓ **La couche fissurée.** Son sommet est la base de la couche de saprolite sus-jacente et constitue le toit du socle sain ;
- ✓ **La roche saine.** Son sommet est la base de la couche fissurée et sa base a été fixée arbitrairement à 200 m (Figure 12).

A partir des fiches techniques de forages, la géométrie 3D du toit des altérites (ou topographie), du toit de la couche fissurée, et du toit du socle sain (mur de la couche fissurée) sont intégrés dans le modèle.

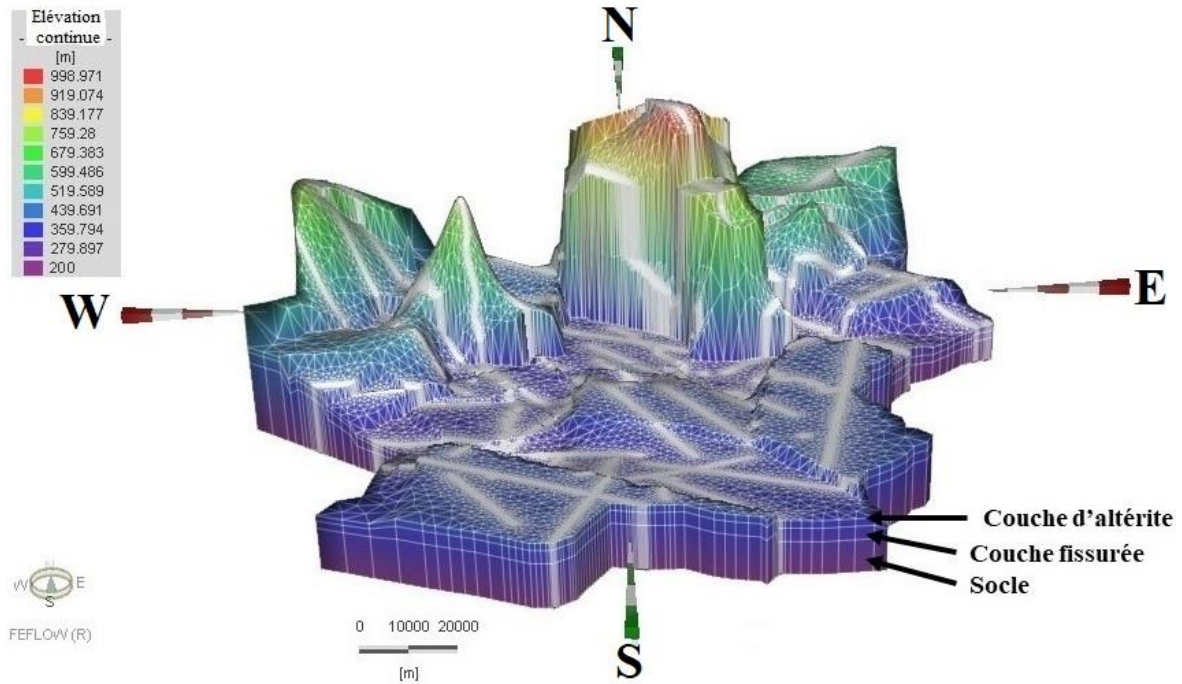


Figure 12: Modèle 3D des différentes couches de l'aquifère du département de Man

3.1.3.2. Calage du modèle

La reconstitution de la piézométrie initiale par le modèle a permis de déterminer les valeurs des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, ainsi que leur répartition spatiale. A partir de ces données, le calage effectué manuellement a permis d'obtenir une bonne corrélation entre les charges observées et calculées (simulées) avec une RMS égale à 5,18%. Le graphique de la figure 13 présente le niveau d'ajustement entre les charges observées et celles calculées par le modèle en milieu saturé. Les points d'observation sont proches de la droite de la première bissectrice. Ces ajustements entre les charges simulées et les charges mesurées du modèle en milieu continu discrétisé ont permis d'obtenir des conductivités hydrauliques qui sont 1 000 ; 10 000 voire 100 000 fois supérieures à celles estimées sur le terrain. Les conductivités hydrauliques de la première couche (altérite) qui sont $K= 6,82.10^{-7}$ m/s ; $K= 2,23.10^{-6}$ m/s ; $K= 4,07.10^{-7}$ m/s et $K= 3,57.10^{-7}$ m/s respectivement pour les domaines de granitoïdes homogènes, granitoïdes hétérogènes à biotite, charnockites et amphibolites passent à $K= 2,51.10^{-4}$ m/s pour toutes les formations géologiques. Concernant la deuxième couche (fissurée), les conductivités hydrauliques sont $K= 4,36.10^{-6}$ m/s pour les fractures traversant les granitoïdes homogènes ; $K= 2,64.10^{-7}$ m/s pour les fractures traversant les granitoïdes hétérogènes à biotite ; $K= 2,06.10^{-7}$ m/s pour les fractures traversant les charnockites et $K= 3,83.10^{-6}$ m/s pour les fractures

Résultats et discussion

traversant les amphibolites. Elles passent à $K= 2,66.10^{-3}$ m/s pour toutes les formations géologiques. Sur la troisième couche (socle sain), $K= 10^{-9}$ m/s passe à $K= 2,45.10^{-9}$ m/s.

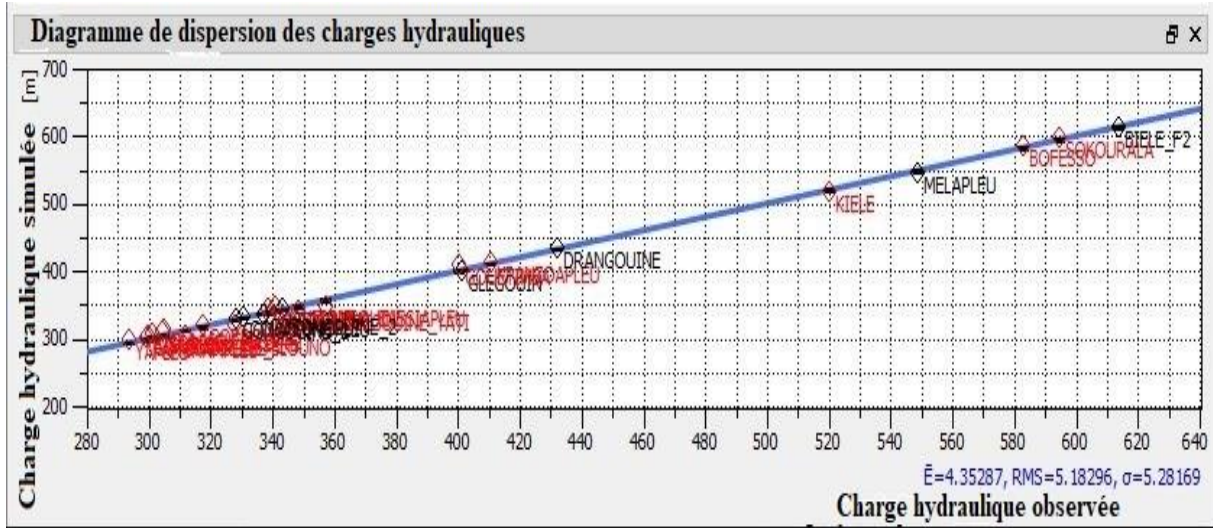


Figure 13 : Diagramme des charges calculées et observées en régime permanent

Le calage a été considéré satisfaisant lorsqu'il n'a plus été possible de diminuer les écarts entre les données mesurées et les données calculées. La figure 14 montre que le coefficient de distribution R^2 est égal à 0,9971.

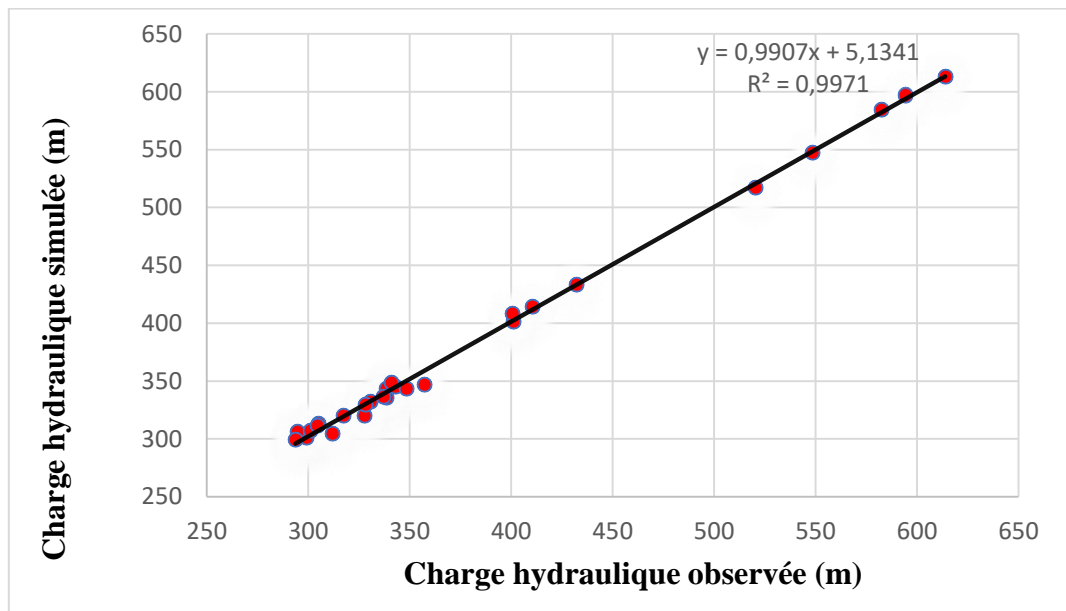


Figure 14 : Corrélation des charges hydrauliques mesurées et calculées

La racine carrée de la moyenne des écarts normalisés (NRMS) est égale à 5,18 % (inférieur à 10 %). La moyenne des écarts absolus entre la piézométrie observée et celle simulée est de 4,35 m (Tableau VI). L'écart-type entre les différentes charges hydrauliques est égal à 5,28 m.

Tableau VI : Valeurs de vérification du calage du modèle

Erreurs	Symbole	Valeur	Unité
Moyennes des écarts des charges hydrauliques	$\overline{ E }$	4,35	m
Ecart-type des erreurs des charges hydrauliques	σ	5,28	m
Ecart quadratique moyen	EQM	6,48	m
Racine carrée de la moyenne des écarts normalisés des charges hydrauliques	NRMS	5,18	%

3.1.3.3. Cartes piézométriques observée et simulée

La comparaison entre les piézométries observée et simulée constitue déjà un moyen visuel pour évaluer la qualité de l'ajustement, quoique les erreurs commises lors des interpolations ne soient pas négligées. Les deux cartes piézométriques (cartes observée et simulée) présentent sensiblement les mêmes allures. La figure 15 indique les cartes piézométriques des charges observées (a) et simulées (b) par le modèle. La direction de l'écoulement souterraine s'effectue principalement du Nord vers le Sud. Ce sens de circulation est imposé par le fait que les charges hydrauliques du Nord sont plus élevées que celles du Sud. Les isopièzes sont plus resserrées au Nord qu'au Sud.

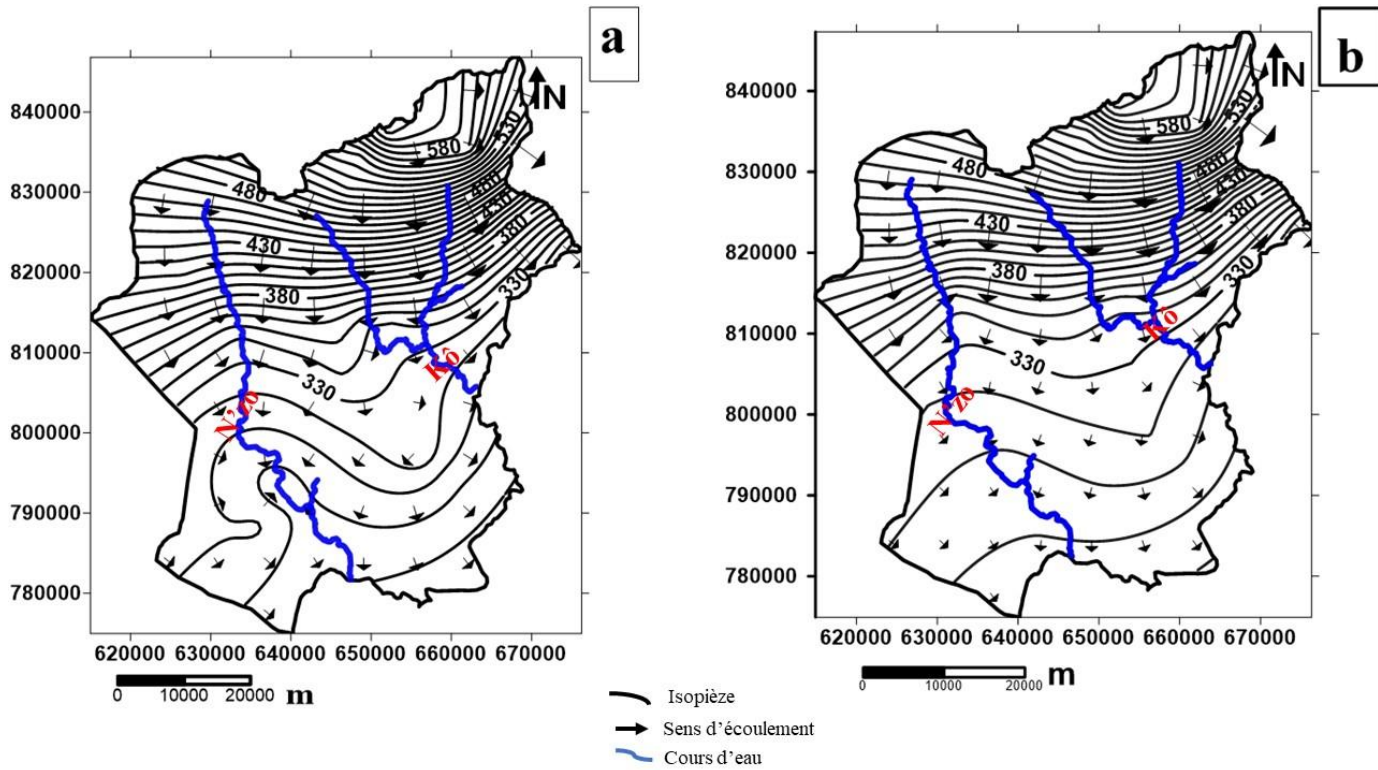


Figure 15 : Cartes piézométriques des charges observées et simulées en Août 2020

3.2. Discussion

Le bilan hydrologique global montre que l'évapotranspiration réelle (ETR) est le terme le plus dominant avec une valeur de 1 104,7 mm soit 70% des précipitations. Cette valeur est sensiblement identique à celle obtenue par Lasm (2000) dans la région des montagnes qui est 1 105 mm. La lame d'eau infiltrée, qui est de 244,5 mm reste sensiblement identique à celle obtenue dans la région des montagnes (226,1 mm) par Lasm (2000). Cependant, cette valeur est supérieure à celles obtenues par Oularé (2015) qui varient de 0 à 80 mm/an et à la valeur maximale de 114 mm/an obtenue par Kouamé (2011) avec le modèle distribué Hydrotel. La différence au niveau des valeurs de recharge estimées proviendrait de l'approche de calcul du ruissellement. En effet, Oularé (2015) a calculé le ruissellement à partir des caractéristiques physiographiques (type de sol, pente, couverture végétale, etc.). Il en est de même pour Kouamé (2011), qui également a pris en compte l'influence du ruissellement avec le modèle Hydrotel. Dans cette étude, le ruissellement a été estimé en fonction de la pluie tombée. Les études de sensibilité ont montré que l'infiltration dans le bassin versant du N'zo peut atteindre 300 mm/an en fonction du coefficient de ruissellement (Oularé, 2015).

L'analyse de plusieurs lithologs de forages a permis de proposer un modèle de profil d'altération. Celui-ci présente du sommet à la base une structuration verticale avec trois couches distinctes : la couche des altérites couverte par la terre végétale et composée de plusieurs

Résultats et discussion

formations (les latérites, les formations sableuses, de sables argileux ou argilo-sableuses, de l'argile et d'arènes granitique), la couche fissurée et la roche saine. Ce profil est en accord avec ceux proposés ces dernières années en milieu de socle par Dewandel *et al.* (2006), Lachassagne *et al.* (2011) et qui soutiennent que la conductivité hydraulique des aquifères de socle est due au processus d'altération et non à la fracturation tectonique et à la décompression lithostatique. La roche saine du département composée essentiellement de roche granitique est sensible à l'altération. En effet, les travaux de Koita (2010) dans la région de Dimbokro-Bongouanou ont montré que le démantèlement des produits d'altération des granites est favorisé par l'absence de croûtes ferrugineuses (cuirasses ferrugineuses) dans les profils, et donc de protection vis-à-vis des processus d'érosion. Dans le département de Man, l'épaisseur totale du profil d'altération peut atteindre 70 m. Cette valeur est largement supérieure à celle obtenue par Koita (2010) à Dimbokro (2 à 20 m) mais inférieure à celle proposée par Wyns *et al.* (1999) qui peut atteindre 100 m. Cette différence d'épaisseur pourrait être liée à la structure du granite. La variation des épaisseurs d'altération pourrait aussi dépendre de l'intensité de fracturation, du type de climat, du processus d'altération et des conditions de drainage (Lasm, 2000).

Les valeurs de transmissivité calculées à partir des données (remontée) d'essai de pompage à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob varient de $2,03 \cdot 10^{-6}$ à $1,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Faillat (1986) trouve des ordres de grandeurs de transmissivités compris entre 10^{-7} et $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les roches cristallines et cristalloyphyllics de Côte d'Ivoire. Les travaux de Biémi (1992) donnent également ces mêmes ordres de grandeur. Les valeurs de perméabilité calculées sont comprises entre $3,57 \cdot 10^{-8}$ et $2,96 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ pour une moyenne de $3,02 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Dans la région du N'zi-Comoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire), Kouassi *et al.* (2013) ont obtenu des valeurs allant de $1,79 \cdot 10^{-8}$ à $3,80 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ pour une moyenne de $6,35 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Les résultats de cette étude sont sensiblement identiques à ceux obtenus par Kouassi *et al.* (2013) du fait que les deux études ont été réalisées en milieu de socle. En effet, cette étude a été menée à partir de la méthode de Cooper-Jacob alors que Kouassi *et al.* (2013) se sont appuyés sur la méthode de Hvorslev pour l'estimation de la conductivité hydraulique. De plus, les valeurs des porosités de drainage obtenues sont comprises entre 3 % et 23,33 %. Elles sont dans la gamme des porosités proposées dans les travaux de De Marsily (2004). Cet auteur a montré la relation entre fluide-solide en milieu poreux tout en donnant la gamme de la porosité comprise entre 0,02 et 90%. Tous ces résultats obtenus peuvent se justifier par le fait que les formations géologiques du département de Man sont archéennes donc plus transmissives. Ces formations sont

Résultats et discussion

transmissives en raison de leur remarquable fracturation et leur Bonnes propriétés géométriques développées par leurs réservoirs Kouamé (1999).

Le modèle a été conçu et calibré en régime permanent à partir des données piézométriques de forages et des paramètres hydrodynamiques. La réalisation du modèle numérique a été faite suivant les étapes de Anderson & Woessner (1992). La valeur de la NRMS obtenue à partir du modèle est de 5,18%. Cette valeur permet d'affirmer que le calage est satisfaisant car selon McDonald & Harbaugh (1988), Leblanc (1999), le calage est jugé bon pour une valeur de NRMS < 10 %. Cette valeur est proche de celle obtenue par Kouassi (2017) qui est de 4,96 % pour la nappe de la commune de Daloa. Kouamé (2007) par la même méthode a obtenu une valeur de NRMS de 4,63 % au niveau de la nappe d'Abidjan. Le bon calage du modèle est aussi apprécié par une bonne correspondance entre les charges observées sur le terrain et celles simulées par le modèle. Dans l'ensemble, il existe une bonne corrélation entre les charges simulées et les charges observées. En effet, les niveaux d'eau simulés sont relativement identiques aux niveaux d'eau observés. Malgré ce bon résultat de calage, de fortes différences s'observent entre certaines charges hydrauliques calculées par FEFLOW et celles observées sur le terrain. Cependant, cette différence entre les charges hydrauliques pourrait être due à la complexité des formations géologiques de cet aquifère. Les légères différences observées entre les charges simulées et observées ne mettent pas en cause le bon calage du modèle. Ces dernières pourraient être dues en partie, à l'influence causée par l'exploitation des forages et aussi par les interactions nappe/rivière (Kamenan, 2021)

Au niveau de la piézométrie, 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). Les zones de recharge se trouvant sur la carte issue de la piézométrie observée, n'ont pas été parfaitement reproduites par le modèle vu l'absence de la zone de recharge issue de la piézométrie simulée. Cela peut être dû à la réaction locale de certains forages. Cela pourrait aussi s'expliquer par le fait que le modèle tient compte des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. La piézométrie du département de Man à partir de ce modèle calé en régime permanent, a montré que les eaux souterraines de la nappe coulent du Nord vers le Sud. Ce sens de circulation est imposé par le fait que les charges hydrauliques du Nord sont plus élevées que celles du Sud. Les isopièzes sont plus resserrées au Nord qu'au Sud du fait que le Nord est plus accidenté que le Sud. Les altitudes les plus élevées sont situées au Nord du département de Man.

Conclusion partielle

La troisième partie montre que la recharge du département de Man est de 244,5 mm/an. Le profil d'altération de la zone montre trois couches qui sont, du sommet à la base, la couche des altérites, la couche fissurée et le socle sain. Les transmissivités varient de $2,03.10^{-6}$ à $1,94.10^{-3}$ m^2/s avec une moyenne de $1,15.10^{-4}$ m^2/s . Les perméabilités des couches d'altérites varient de $2,77.10^{-6}$ à $2,22.10^{-5}$ m/s, avec une moyenne de $1,35.10^{-5}$ m/s et les perméabilités des aquifères varient de $3,57.10^{-8}$ à $2,96.10^{-5}$ m/s pour une moyenne de $3,02.10^{-6}$ m/s. Le modèle réalisé à partir du logiciel FEFLOW montre que les eaux souterraines s'écoulent du Nord vers le Sud et la valeur de NRMS est égale à 5,18 %.

CONCLUSION

Conclusion

L'objectif principal de cette étude est d'élaborer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) afin de contribuer à une meilleure connaissance de leur comportement hydrodynamique. L'interprétation et le traitement des données ont permis d'obtenir plusieurs résultats. La recharge a été calculée par la méthode de Thornthwaite. Sa valeur moyenne obtenue est de 244,5 mm/an. Elle contribue à la recharge des aquifères. Le profil d'altération de la zone montre trois couches. Ce modèle est composé du sommet à la base d'une terre végétale, des altérites, d'une couche fissurée et d'un socle sain. Il existe une hétérogénéité entre les différents profils du département. De plus, cette étude montre qu'au niveau du département, les transmissivités varient de $2,03 \cdot 10^{-6}$ à $1,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $1,15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Les perméabilités des couches d'altérites varient de $2,77 \cdot 10^{-6}$ à $2,22 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, avec une moyenne de $1,35 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ et les perméabilités des aquifères varient de $3,57 \cdot 10^{-8}$ à $2,96 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ pour une moyenne de $3,02 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$. Le modèle hydrogéologique réalisé à partir du logiciel FEFLOW a permis, grâce au calage en régime permanent, de montrer que les eaux s'écoulent du Nord vers le Sud et d'obtenir une valeur de NRMS égale à 5,18%. La modélisation hydrogéologique a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique du département de Man.

Au terme de cette étude, il conviendrait comme perspectives de :

- élaborer un modèle en régime transitoire pour appréhender le comportement du système aquifère ;
- modéliser le transfert de polluants pour connaître leur temps de transit dans l'aquifère.

Pour une bonne gestion et le suivi de la qualité des ressources en eaux souterraines, nous recommandons de :

- faire des essais de traceurs pour déterminer avec exactitude la porosité de drainage ;
- implanter des piézomètres d'observation bien répartis pour faciliter le suivi régulier du niveau de l'eau.

RÉFÉRENCES

Références

- Anderson M.P. & Woessner W. (1992). Applied groundwater modeling : simulation flow and advective transport. Academic Press, 381 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens 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'État ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 493 p.
- Brochet P. & Gerbier N. (1968). L'évapotranspiration, aspect agro-météorologique ; évaluation pratique de l'ETP. Édition Météorologie Nationale, Monographie, 67 p.
- Camil J., Tempier P. & Caen-Vachette M. (1984). Schéma pétrographique, structural et chronologique des formations archéennes de la région de Man (Côte d'Ivoire). Leur rôle dans la cratonisation de l'Ouest Africain. *Géologie Africaine*, 1 : 1-10.
- Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Infoscience, Dunod, Paris (France), 236 p.
- De Marsily G. (2004). Hydrogéologie quantitative. Academic Press, Masson, Paris (France), 236 p.
- Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C. & Krishnamurthy N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330(1-2) : 260–284.
- Diersch H-J.G. (1998). Reference manual, FEFLOW, interactive, graphics based 168 finite element simulation system for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes. WAZY Institute For Water Resources Planning And Systems Research Ltd, 180 p.
- Djro S.C. (1998). Evolution tectono-métamorphique des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 171 p.
- Dupont J., Smits J., Rousseau A.N., Mailhot A. & Gangbazo G. (1998). Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11 : 5-18.

Références

- Faillat J.P. (1986). Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest). *Hydrogéologie*, 1 : 65-76.
- Fall M.D. (2012). Modélisation hydrogéologique conceptuelle de la nappe des sables quaternaires du littoral Nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Mémoire de Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement, département Hydrogéologie, Institut d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), (Ouagadougou, Burkina Faso), 88 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. Mémoire de DEA en Sciences de la Terre option Hydrogéologie, 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 Planetary Science*, 3 : 23–28.
- Géomines (1982). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, République de Côte d'Ivoire, Cahier de Danané, 16 p.
- Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H. & Van Genuchten M.T. (2010). Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. *Pedosphere*, 20(4) : 456–465.
- Giao P.H., Weller A., Hien D.H. & Adisornsupawat K. (2008). An approach to construct the weathering profile in a hilly granitic terrain based on electrical imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 65(1) : 30-38.
- INS (2015). Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014. Données socio-démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités : Région du Tonkpi, 26 p.
- Jourda J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430 p.

Références

- Kamenan Y.M. (2021). Élaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (Côte d'Ivoire), 170 p.
- Koita M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle (Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Techniques du Languedoc, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 220 p.
- Kouadio E.K., Savané I., Lasm T. & Biémi J. (2008). Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metarmorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential. *European Journal of Scientific Research*, 22(3) : 373-390.
- Kouamé A.A. (2017). Apport de la modélisation hydrogéologique dans l'étude des risques de contamination de la nappe d'Abidjan par les hydrocarbures : cas du benzène dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui-Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 312 p.
- Kouamé K.F. (1999). Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3è cycle, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 210 p.
- Kouamé K.F. (2011). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique Hydrotel. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 304 p.
- Kouamé K.F., Lasm T., Saley M.B., Tonyé E., Bernier M. & Wade S. (2009). Extraction linéaire par morphologie mathématique sur une image RSO de Radarsat-1 : application au socle Archéen de la Côte d'Ivoire. Journées d'Animation Scientifique AUF (JAS 09), 8-11 Novembre 2009, Alger (Algérie), 8 p.

Références

- 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), 230 p.
- Kouamélan A.N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1 (France), 284 p.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley B.M. & Koffi Y.B. (2007). Identification of tendencies with in the rainfall-runoff relation and refill of the tablecloths in a context of hydroclimatic variability in the catchment area of N'zi (Bandama) in Ivory Coast. *European Journal of Scientific Research*, 16 : 412-425.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Biémi J. (2013). Application du modèle de Maillet à l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Journal of Asian Scientific Research*, 3(2) : 214-228.
- Kouassi K.J.M. (2017). Modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère d'altérite : cas de la ville de Daloa (Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Génie de L'Eau et de l'Environnement option Hydrogéologie, Université Jean Lorougnon Guédé-Daloa (Côte d'Ivoire), 73 p.
- Lachassagne P., Wyns R., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.F. & Lestrat P. (2001). Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *GroundWater*, 39(4) : 568–581.
- 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 : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Thèse de Doctorat. Université de Poitiers (France), 233 p.

Références

- Leblanc Y. (1999). Prédiction de l'effet du décapage d'une mine à ciel ouvert sur l'hydrogéologie locale à l'aide de la modélisation numérique Système Géostatistique International, Laval, (Québec au Canada), 23 p.
- Leblond P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de Doctorat 3^è cycle, Université de Bordeaux 1 (France), 150 p.
- Ledoux E. (1986). Modèles mathématiques en hydrogéologie. Centre d'informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 120 p.
- Leduc C. (2005). Modélisation numérique en hydrogéologie. Cours, Université Paris Sud - Paris XI (France), 198 p.
- Mangoua O.M.J., Yao A.B., Douagui G.A., Kouassi K.A., Goula B.T.A. & Biémi J. (2019). Evaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissurés dans le bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 37: 53-74.
- 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(11) : 1-17.
- Mc Donald M.G. & Harbaugh A.W. (1988). A modular three dimensional finite difference groundwater flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1* Washington (USA), 586 p.
- N'guessan A. (1985). Contribution à l'hydrogéologie de la région Centrale de la Côte d'Ivoire et analyse statistique des résultats de forage. Thèse de Doctorat 3^è cycle, Université de Franche-Comté (Besançon, France), 154 p.
- Ouattara A., Méité A., Dally T., Ouattara H. & Kati-Coulibaly S. (2016). Étude de la qualité des eaux de consommation dans la localité de N'Zianouan s/p de Tiassalé et des quartiers précaires de trois communes du District d'Abidjan (Koumassi, Treichville, Attécoubé). *Journal of Applied Biosciences*, 102 : 9708-9715.
- Oularé S. (2015). Simulation du contrôle de la recharge, de la conductivité hydraulique et de la topographie sur les écoulements souterrains et la surface libre de la nappe dans le bassin versant du N'zo à Kahin (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en

Références

- Hydrogéologie, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 157 p.
- Perraud A. (1971). Les sols de Côte d'Ivoire. In Le milieu naturel en Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, France, 50, 391 p.
- Pinder G.F. & Celia M.A. (2006). Subsurface Hydrology. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 488 p.
- Robinson B. & Ipsen E.C. (2007). Groundwater modeling report. Arkema, Inc. Facility Portland, Oregon, 120 p.
- Roy A. (1998). Conception par modélisation numérique d'un essai de restauration *in situ* à l'aide de solutions tensioactives sur des sols contaminés aux BPC. Rapport INRS Géorressources, Université du Québec (Canada), 144 p.
- Saley M.B. (2003). Système d'informations à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 209 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'Etude 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 Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 396 p.
- 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 en Cotutelle, Université Pierre et Marie Curie–Paris (Paris, France) -2iE (Ouagadougou, Burkina Faso), 303 p.
- Soro N., Soro G., Ahoussi K.E., Saley M.B., Lasm T. & Biémi J. (2007). Caractérisation spatio-temporelle des précipitations dans le « V » Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours

Références

- de la période 1966-2000. *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, 2 : 89-108.
- Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legtchenko A. & Vairon J. (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175(1) : 21-34.
- Wyns R., Gourry J.C., Baltassat J.M. & Lebert F. (1999). Caractérisation multiparamètre des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré. Actes du 2e Colloque GEOFCAN : Géophysique des sols et des formations superficielles. BRGM, INRA, IRD, UPMC, 21-22 septembre 1999, Orléans (France), pp. 105- 110.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.
- Zheng C. & Bennett G.D. (2002). Applied contamination transport modelling. Van Nostrand Reinhold, 656 p.

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Transmissivités des aquifères du département de Man

Forage	Transmissivité (m²/s)	Forage	Transmissivité (m²/s)
Dainé 1 F2	6,71.10 ⁻⁶	Kpangouin F1	2,74.10 ⁻⁴
Dainé 1 F3	1,14.10 ⁻⁴	Kpanzoapleu	1,58.10 ⁻⁵
Dainé 1 F4	3,84.10 ⁻⁶	Kpata F1	2,64.10 ⁻⁵
Dainé 2	8,87.10 ⁻⁶	Kpata F2	9,16.10 ⁻⁶
Déoulé F1	3,28.10 ⁻⁵	Kpongouin	2,90.10 ⁻⁵
Déoulé F3	1,85.10 ⁻⁵	Lagoulalé	4,53.10 ⁻⁴
Dompleu F1	3,85.10 ⁻⁵	Lamapleu F1	2,91.10 ⁻⁵
Dompleu F2	5,63.10 ⁻⁶	Lamapleu F2	5,39.10 ⁻⁶
Dompleu F3	2,59.10 ⁻⁴	Petit Gbapleu	3,62.10 ⁻⁵
Drangouiné F2	1,78.10 ⁻⁴	Sangouiné F1	1,96.10 ⁻⁵
Gbangbéguiné F1	5,77.10 ⁻⁶	Sangouiné F3	3,06.10 ⁻⁶
Gbatodié	5,85.10 ⁻⁵	Sangouiné F5	1,32.10 ⁻⁵
Glegouin F1	6,44.10 ⁻⁵	Sangouiné F7	1,01.10 ⁻⁵
Gbloalé	5,13.10 ⁻⁶	Seupleu F1	6,34.10 ⁻⁵
Glayogouin F1	1,45.10 ⁻⁴	Seupleu F2	7,92.10 ⁻⁶
Glongouin F1	8,46.10 ⁻⁵	Singouin	4,18.10 ⁻⁵
Gogouin	7,84.10 ⁻⁴	Singouiné F1	1,35.10 ⁻⁵
Gotondié	1,89.10 ⁻⁴	Singouiné F2	2,81.10 ⁻⁴
Gotongouiné 1 F1	7,16.10 ⁻⁶	Sokourala	2,03.10 ⁻⁶
Gotongouiné 1 F2	6,45.10 ⁻⁵	Tiakeupleu	6,71.10 ⁻⁵
Gotongouiné 2 F1	2,01.10 ⁻⁴	Tiapleu	2,09.10 ⁻⁵
Gotongouiné 2 F3	3,62.10 ⁻⁴	Zadepleu	4,74.10 ⁻⁶
Goualé F2	8,97.10 ⁻⁵	Zagoué F2	1,70.10 ⁻⁵
Gouéningouin	1,29.10 ⁻⁵	Zélé F1	8,67.10 ⁻⁵
Gouétomba F2	6,07.10 ⁻⁶	Zélé F2	1,73.10 ⁻⁵
Gouimpleu1 F1	1,60.10 ⁻⁵	Zélé foyer rural	1,21.10 ⁻⁴
Gouimpleu1 F2	6,90.10 ⁻⁴	Yébéguin	1,34.10 ⁻⁴

Annexes

Gueupleu F1	$1,94.10^{-3}$	Zérégouin	$3,34.10^{-5}$
Gueupleu F2	$2,17.10^{-5}$	Ziogoualé	$2,85.10^{-5}$
Guiapleu F1	$9,73.10^{-6}$	Zoba F1	$8,40.10^{-6}$
Guiapleu F2	$4,57.10^{-6}$	Issonneu	$5,63.10^{-5}$

Annexe 2 : Perméabilités des aquifères du département de Man

Forage	Perméabilité (m/s)	Forage	Perméabilité (m/s)
Dainé 1 F2	$1,80.10^{-5}$	Kpangouin F1	$2,08.10^{-6}$
Dainé 1 F3	$2,64.10^{-7}$	Kpanzoapleu	$9,24.10^{-6}$
Dainé 1 F4	$1,79.10^{-7}$	Kpata F1	$4,91.10^{-7}$
Dainé 2	$2,22.10^{-6}$	Kpata F2	$4,31.10^{-7}$
Déoulé F1	$6,22.10^{-8}$	Kpongouin	$1,79.10^{-7}$
Déoulé F3	$2,64.10^{-7}$	Lagoulalé	$9,83.10^{-7}$
Dompleu F1	$1,16.10^{-6}$	Lamapleu F1	$1,53.10^{-5}$
Dompleu F2	$4,13.10^{-7}$	Lamapleu F2	$7,74.10^{-7}$
Dompleu F3	$8,34.10^{-7}$	Petit Gbapleu	$1,82.10^{-6}$
Drangouiné F2	$1,41.10^{-7}$	Sangouiné F1	$5,11.10^{-7}$
Gbangbéguiné F1	$5,13.10^{-6}$	Sangouiné F3	$8,04.10^{-8}$
Gbatodié	$4,36.10^{-6}$	Sangouiné F5	$2,45.10^{-7}$
Glegouin F1	$8,66.10^{-8}$	Sangouiné F7	$1,38.10^{-7}$
Gbloalé	$1,56.10^{-6}$	Seupleu F1	$1,08.10^{-6}$
Glayogouin F1	$1,61.10^{-6}$	Seupleu F2	$2,70.10^{-7}$
Glongouin F1	$6,97.10^{-8}$	Singouin	$1,26.10^{-6}$
Gogouin	$3,83.10^{-6}$	Singouiné F1	$4,30.10^{-7}$
Gotondié	$2,23.10^{-6}$	Singouiné F2	$1,02.10^{-5}$
Gotongouiné 1 F1	$2,36.10^{-5}$	Sokourala	$3,57.10^{-8}$
Gotongouiné 1 F2	$1,78.10^{-6}$	Tiakeupleu	$2,09.10^{-6}$
Gotongouiné 2 F1	$6,19.10^{-6}$	Tiapleu	$4,07.10^{-7}$
Gotongouiné 2 F3	$5,89.10^{-6}$	Zadepleu	$1,65.10^{-7}$
Goualé F2	$2,64.10^{-6}$	Zagoué F2	$4,19.10^{-7}$

Annexes

Gouéningouin	$4,68.10^{-7}$	Zélé F1	$3,78.10^{-6}$
Gouétomba F2	$1,99.10^{-7}$	Zélé F2	$7,04.10^{-7}$
Gouimpleu1 F1	$8,20.10^{-7}$	Zélé foyer rural	$2,86.10^{-6}$
Gouimpleu1 F2	$1,58.10^{-7}$	Yébégouin	4.10^{-6}
Gueupleu F1	$2,96.10^{-5}$	Zérégouin	1.10^{-6}
Gueupleu F2	$5,56.10^{-7}$	Ziogoualé	$7,73.10^{-7}$
Guiapleu F1	$2,04.10^{-7}$	Zoba F1	$1,65.10^{-7}$
Guiapleu F2	$7,89.10^{-8}$	Issonneu	$1,65.10^{-7}$

RÉSUMÉ

Dans le département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire), l'alimentation en eau des populations est assurée essentiellement par des eaux souterraines de socle. Cette évolution démographique associée à l'évolution des activités économiques engendre une forte pression sur les ressources en eau souterraine. Ce travail a pour objectif de contribuer à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés pour une gestion durable des ressources en eau souterraine. A cette fin ; la présente étude procède d'abord à l'estimation de la recharge des aquifères à l'aide de la méthode de Thornthwaite. Ensuite, la caractérisation du système aquifère qui s'est faite principalement par la détermination des propriétés hydrodynamiques à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob puis à l'aide de l'interprétation des lithologues. Enfin, les résultats obtenus ont permis de réaliser un modèle numérique et simuler l'écoulement dans le domaine étudié à l'aide du logiciel FEFLOW 7.3. La valeur de la RMS normalisée est de 5,18 % (<10 %), indiquant la satisfaction du bon calage du modèle. Aussi, les axes préférentiels d'écoulement à savoir les axes Nord-Sud. L'ensemble des informations géologiques et hydrogéologiques a permis de faire une simulation numérique qui reproduit l'écoulement observé.

Mots clés : Hydrogéologie, Hydrodynamique, Simulation numérique, FEFLOW, Man.

ABSTRACT

In the department of Man (West of Côte d'Ivoire), the water supply of the population is essentially provided by groundwater. This demographic evolution associated with the evolution of the economic activities generates a strong pressure on the groundwater resources. This work aims to contribute to a better knowledge of the hydrodynamic functioning of fissured aquifers for a sustainable management of groundwater resources. To this end, the present study first estimates the recharge of aquifers using the Thornthwaite method. Then, the characterisation of the aquifer system which was done mainly by determining the hydrodynamic properties using the Cooper-Jacob method and then using the interpretation of the lithologues. Finally, the results obtained allowed the creation of a numerical model and the simulation of the flow in the studied area using FEFLOW 7.3 software. The value of the normalised RMS is 5.18 % (<10 %), indicating satisfaction with the good calibration of the model. Also, the preferential flow axes namely the North-South axes. All the geological and hydrogeological information was used to produce a numerical simulation that reproduces the observed flow.

Keywords: Hydrogeology, Hydrodynamics, Numerical simulation, FEFLOW, Man.