



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE  
UFR ENVIRONNEMENT**

**REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE**

**Union-Discipline-Travail**  
-----

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique**

**ANNEE : 2022-2023**

**N°D'ORDRE :**

**CANDIDAT**

**Nom : KOKOBOU**

**Prénoms : Kouassi Hervé**

**Jacques**

## **THESE DE DOCTORAT**

**Pour l'obtention du grade de Docteur de  
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE  
Mention : Géosciences et Environnement**

**Spécialité : HYDROGEOLOGIE ET SIG**

**Elaboration d'une base de données liée aux  
forages et analyse géospatiale par Système  
d'Information Géographique : cas des  
départements de Yamoussoukro et de  
Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire)**

### **JURY**

**Président** : M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé

**Directeur** : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

**Rapporteur** : M. KOUASSI Kouakou Hervé, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

**Examineur** : M. YOUAN Ta Marc, Maître de Conférences, Université Félix Houphouët-Boigny

**Examineur** : M. MANGOUA OI Mangoua Jules, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

**Soutenu publiquement  
le 09 / 03 / 2023**

## TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	I
DEDICACE.....	VII
REMERCIEMENTS .....	VIII
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS .....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DE FIGURES .....	XIII
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : GENERALITES .....	4
CHAPITRE 1: CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES DEPARTEMENTS DE YAMO USSOUKRO ET DE TOUMODI.....	5
1.1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL.....	5
1.1.1 LOCALISATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	5
1.1.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA ZONE D’ETUDE.....	5
1.1.2.1 Relief.....	5
1.1.2.2 Climat.....	7
1.1.2.3 Hydrographie .....	8
1.1.2.4 Végétation .....	9
1.1.2.5 Sols.....	9
1.1.3 ENVIRONNEMENT HUMAIN ET SOCIO-ECONOMIQUE .....	10
1.1.3.1 Environnement humain.....	10
1.1.3.2 Environnement socio-économiques .....	10
1.1.3.2.1 Agriculture .....	10
1.1.3.2.2 Élevage et ressources halieutiques .....	11
1.1.3.2.3 Tourisme.....	11
1.1.3.2.4 Approvisionnement en eau potable .....	12
1.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES DEPARTEMENTS DE YAMO USSOUKRO ET DE TOUMODI.....	12
1.2.1 Aperçu géologie des départements de Yamoussoukro et de Toumodi .....	12
1.2.2 Aperçu hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.....	14

## TABLE DES MATIERES

1.2.2.1	Aquifère des altérites.....	14
1.2.2.2	Aquifère de fissures.....	14
CHAPITRE 2 : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES BASES DE DONNÉES, LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE, LES AQUIFERES ET L'ANALYSE SPATIALE.....		16
2.1	GENERALITES SUR LES BASES DE DONNEES.....	16
2.1.1	Définition.....	16
2.1.2	Objectifs de la base de données.....	16
2.1.2.1	Partage de l'information.....	16
2.1.2.2	Organisation des données indépendamment des programmes.....	17
2.1.3	Historique des SGBD.....	17
2.1.4	Caractéristiques d'un SGBD.....	19
2.1.5	Différents types de SGBD et leur apport dans la gestion des eau souterraines.....	20
2.2	PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE DE SOCLE ET L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE.....	22
2.2.1	Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère de socle.....	22
2.2.1.1	Transmissivité.....	22
2.2.1.2	Perméabilité des aquifères.....	22
2.2.1.3	Porosité.....	23
2.2.1.4	Débit spécifique.....	23
2.2.1.5	Coefficient d'emmagasinement.....	23
2.2.2	Approche géostatistique.....	24
2.2.2.1	Les hypothèses d'application de la géostatistique.....	24
2.2.2.2	Variogramme.....	26
2.3	ANALYSE MULTICRITERE.....	29
2.4	APPORT DES SIG DANS LA PROSPECTION DE L'EAU SOUTERRAINE.....	30
2.5	SYNTHESE SUR L'ETAT DU SERVICE D'HYDRAULIQUE RURALE ET LA NOTION D'ANALYSE SPATIALE.....	33
PARTIE II : MATERIEL ET METHODES.....		35
CHAPITRE 3 : DONNEES ET MATERIEL.....		36
3.1	DONNEES.....	36
3.1.1	Données hydrogéologiques.....	36

## TABLE DES MATIERES

3.1.2 Données démographiques .....	37
3.1.3 Données cartographiques .....	37
3.1.4 Données satellitaires .....	37
3.2 OUTILS.....	37
3.2.1 Matériel de collecte de données hydrodynamiques .....	37
3.2.2 Matériel de traitement de données .....	38
CONCLUSION PARTIELLE.....	39
CHAPITRE 4 : METHODES .....	40
4.1 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES A REFERENCE SPATIALE DES FORAGES.....	40
4.1.1 Choix de la méthode Merise .....	40
4.1.2 Etapes de la conception.....	41
4.1.3 Modélisation des données .....	41
4.1.3.1 Modélisation Conceptuelle des Données (MCD).....	41
4.1.3.2 Modélisation logique des données (MLD).....	47
4.1.3.3 Liens entre les tables .....	49
4.1.3.4 Propriétés des tables relationnelles .....	50
4.1.3.5 Traduction du MCD en MLDR.....	50
4.1.3.6 DICTIONNAIRE DES DONNEES (DD).....	51
4.1.4 Réalisation du prototype .....	52
4.1.4.1 Implantation du modèle physique des données (MPD) .....	52
4.1.4.2 Implantation des tables primaires Sous ArcGIS .....	55
4.1.4.3 Implantation des tables secondaires .....	55
4.1.4.4 Réalisation des requêtes .....	56
4.2 ANALYSE STATISTIQUE DES PARAMETRES DE FORAGES .....	57
4.2.1 ANALYSE DES DONNEES.....	58
4.2.1.1 Débit (m <sup>3</sup> /h) .....	58
4.2.1.2 Profondeur totale de l'ouvrage (m).....	59
4.2.1.3 Niveau statique (m).....	59
4.2.1.4 Epaisseur d'Altérites (m) .....	59
4.2.1.5 Transmissivité (m <sup>2</sup> /h).....	60
4.2.1.6 Coefficient d'emménagement .....	61
4.2.1.7 Déterminaion du débit spécifique .....	62

## TABLE DES MATIERES

4.2.1.8 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche d'altérite.....	62
4.2.1.9 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche fissurée.....	63
4.2.1.10 Porosité .....	63
4.2.2 METHODES D'ANALYSES DES PARAMETRES DES FORAGES .....	64
4.2.2.1 Recherche de la formation la plus productive.....	64
4.2.2.2 Sélection des paramètres influençant la productivité par l'ACPN .....	64
4.2.3. Analyse géostatistique des paramètres hydrodynamiques .....	66
4.2.3.1 Analyse exploratoire.....	67
4.2.3.2 Modélisation géostatistique.....	67
4.2.3.3 Validation croisée.....	68
4.2.3.4 Cartographie par krigeage .....	69
4.3. DETERMINATION DES ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES A L'IMPLANTATION DE FORAGES ECONOMIQUES .....	69
4.3.1 Identification des critères .....	70
4.3.2 Détermination de l'aptitude géologique.....	71
4.3.3 Détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau .....	71
4.3.4 Evaluation de l'aptitude hydrogéologique .....	72
4.3.5 Evaluation de l'aptitude morphologique.....	74
4.4. OPTIMISATION DE LA DESSERTE EN EAU POTABLE DANS LES ZONES RURALES DES DEPARTEMENTS DE YAMOISSOUKRO ET DE TOUMODI .....	76
4.4.1 Détermination du poids spatial de chaque forage .....	76
4.4.2 Analyse de l'état du service d'hydraulique.....	79
4.4.3 Projection de la population aux horizons 2027 et 2032 .....	80
CONCLUSION PARTIELLE.....	80
PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	81
CHAPITRE 5 : BASE DE DONNEES SPATIALES OU GEODATABASE.....	82
5.1. Modèle Conceptuel des Données (MCD) .....	82
5.2. Modèle Logique des Données (MLD) .....	84
5.3 Dictionnaire des données du MLDR.....	85
5.4 Fonctionnement du prototype .....	90
5.4.1 Relations entre les tables sous ACCESS .....	90
5.4.2 Exemple de requêtes .....	93

## TABLE DES MATIERES

DISCUSSION .....	94
CONCLUSION PARTIELLE.....	95
CHAPITRE 6 : PARAMETRES DE PRODUCTIVITÉ DES FORAGES.....	96
6.1 ANALYSE DE LA PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DE FISSURES DU SOCLE.....	96
6.1.1 Répartition spatiale des débits d'exploitation.....	97
6.1.2 Analyse des arrivées d'eau (AE) dans le socle .....	98
6.1.3 Productivité des forages selon l'épaisseur d'altérite.....	100
6.1.4 Productivité des forages selon la profondeur.....	100
6.1.5 Productivité des forages selon la lithologie .....	101
6.1.6 Productivité et transmissivité.....	102
6.1.7 Analyse de corrélation entre différents paramètres.....	103
6.1.8 Analyse dans l'espace des variables .....	105
6.2 ANALYSE GEOSTATISTIQUE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES.....	105
6.2.1 Analyse exploratoire des données .....	105
6.2.1.1 Transmissivité.....	105
6.2.1.2 Coefficient d'emmengasinement .....	107
6.2.1.3 Débits spécifiques .....	108
6.2.2 Variogramme directionnel .....	109
6.2.2.1 Transmissivité .....	109
6.2.2.2 Coefficient d'emmengasinement.....	111
6.2.2.3 Débit spécifique.....	112
6.2.3 Cartographie par krigeage.....	114
6.2.3.1 Cartographie par krigeage de la transmissivité .....	114
6.2.3.2 Cartographie par krigeage du coefficient d'emmengasinement.....	115
6.2.3.3 Cartographie par krigeage du débit spécifique.....	117
6.3 DISCUSSION SUR L'ANALYSE STATISTIQUE ET GEOSTATISTIQUE DES PARAMETRES DE FORAGES.....	119
CONCLUSION PARTIELLE.....	122
CHAPITRE 7 : ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES À L'IMPLANTATION DE FORAGES ECONOMIQUES.....	123
7.1 CARTE DE L'APTITUDE GEOLOGIQUE.....	123
7.2 CARTE DES PROFONDEURS DES VENUES D'EAU .....	123

## TABLE DES MATIERES

7.3 CARTE D'APTITUDE HYDROGEOLOGIQUE .....	125
7.4 CARTOGRAPHIE DES ZONES FAVORABLES AUX FORAGES ECONOMIQUES .....	126
7.5 DISCUSSION SUR LA DETERMINATION DES ZONES POTENTIELLEMENT FAVORABLES A L'IMPLANTATION DE FORAGES ECONOMIQUES .....	127
CONCLUSION PARTIELLE.....	128
CHAPITRE 8: DESSERTE EN EAU DANS LES DEPARTEMENTS DE YAMOOUSSOUKRO ET TOUMODI .....	129
8.1 ANALYSE DE L'ETAT DU SERVICE D'HYDRAULIQUE RURALE.....	129
8.1.1 Couverture spatiale .....	129
8.1.2 Typologie de points de service d'eau.....	129
8.2 ÉTAT DE L'EXPLOITATION DES PSE .....	132
8.2.1. Adéquation du système d'approvisionnement de PSE en fonction de la taille de la population .....	132
8.2.2 Analyse de la sollicitation des points d'eau par les populations rurales.....	133
8.3 ESTIMATION DES BESOINS EN INFRASTRUCTURES D'AEP .....	135
DISCUSSION .....	141
CONCLUSION GENERALE .....	144
REFERENCES.....	148
PUBLICATIONS .....	V

DEDICACE

DEDICACE

A

LA MEMOIRE DE MA MERE

*Feu KOSSONOU Akoua*

*Mon PERE, KOKOBOU Kouassi Mahizan qui  
m'a soutenu dans tous les moments de la vie.*

## REMERCIEMENTS

### REMERCIEMENTS

Il m'est agréable, au terme de ce cheminement de longue haleine et de dur labeur, d'exprimer très sincèrement ma reconnaissance à tous ceux, qui de près ou de loin, ont consenti des efforts pour la réalisation de ce travail. Je tiens cependant à m'excuser, en cas d'omission de certaines personnes qui ont également contribué d'une manière ou d'une autre au succès du présent travail. Qu'elles se reconnaissent en ce travail, fruit de leur contribution.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude au Professeur TIDOU Abiba Sanogo Épouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) pour m'avoir permis de réaliser cette thèse dans ladite université.

Je remercie également le Professeur KONE Tidiani, Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé, chargé de la pédagogie, de la recherche, de la vie universitaire et de l'innovation technologique. J'exprime mes sincères remerciements au Professeur AKAFFOU Doffou Sélastique, Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé, chargé de la planification, de la programmation et des relations extérieures.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et surtout pour m'avoir accepté au sein de l'UFR qu'il dirige. Merci cher Maître pour la confiance.

Au Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UFR Environnement, Professeur DIBI Brou, je voudrais témoigner ma gratitude pour m'avoir non seulement accepté dans le laboratoire qu'il dirige, et surtout pour sa disponibilité et les échanges qu'il a eu avec moi, échanges qui ont été d'une contribution significative dans la réalisation de ce travail. Merci cher Maître.

Je remercie spécialement Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences, Responsable du Conseil Pédagogique de l'UFR Environnement d'avoir accepté d'encadrer cette thèse, également pour ses conseils et ses encouragements. Ses conseils avisés et ses orientations ont contribué d'une manière significative à l'avancement de mes travaux. Merci cher Maître pour tous.

J'adresse mes vifs remerciements à tout l'ensemble des membres du jury que sont : le Professeur KONE Tidiani, en qualité de Président, ensuite le Professeur KOUASSI Kouakou Hervé, pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse et pour toutes ses remarques constructives ; puis, les Professeurs YOUAN Ta Marc et MANGOUA OI Mangoua Jules en tant qu'examineurs.

## REMERCIEMENTS

Je traduis ma gratitude et ma reconnaissance au Docteur MANGOUA OI Mangoua Jules, Maître de Conférences et Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour sa contribution significative à l'avancement de mes travaux. Ses conseils avisés et ses questions très constructives m'ont permis d'améliorer ce travail. Merci cher Maître.

Je suis également très reconnaissant envers tous les enseignants-chercheurs qui ont contribué à ma formation, KONAN Kouakou Séraphin, KOUADIO Zilé Alex, KOUDOU Aimé, YAO Affoué Berthe, KOUASSI Kouakou Hervé, ANOH Kouao Armand, ÉBLIN Sampah Georges, SORO Tanina Drissa, KOUAME Yao Morton, BROU Loukou Alexis, : KOFFI Bérenger, KOUADIO Kouamé Jean Olivier pour leurs conseils et contributions significatives à travers la lecture et la correction de ce mémoire. Ils l'ont considérablement amélioré.

Mes sorties sur le terrain m'ont permis de prendre conscience de la difficulté d'obtenir des données. Il s'agit nécessairement d'un travail d'équipe qui n'aurait pas été possible sans la collaboration de plusieurs personnes. Merci à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces différentes campagnes de terrain.

Je voudrais remercier également tous les doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement : TOURE Fanraban Fabrice, KOUASSI Kouassi Jean Michel, KOUASSI Amino Anne-Marie, AKATCHI Akouba Agnès, OUEDÉ Gla Blaise, KONATÉ Yaya, COULIBALY Wawogninlin Brice, GOE Bi Sehi pour leurs sympathies et contributions à la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier la Direction Regionale de l'Hydraulique de la Région du Bélier à travers son Directeur Générale, Monsieur EHOUSSOU Marc qui n'a pas hésité à mettre à notre disposition les données nécessaires pour la réalisation de nos travaux.

Que tous ceux, qui de près ou de loin, ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de ce travail et que j'ai oublié de citer trouvent ici mes sincères remerciements pour leurs soutiens.

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

### LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>AE</b>	: Arrivée d'Eau
<b>AEP</b>	: Adduction en Eau Potable
<b>AMC</b>	: Analyse Multicritère
<b>BD</b>	: Base de Données
<b>BF</b>	: Borne fontaine
<b>DD</b>	: Dictionnaire de Données
<b>DRH</b>	: Direction Régionale de l'Hydraulique
<b>EA</b>	: Epaisseur d'Altération
<b>Eo</b>	: Exaooctet
<b>ES</b>	: Epaisseur de socle
<b>GEE</b>	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
<b>Go</b>	: Gigaooctet
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>HV</b>	: Hydraulique Villageoise
<b>HVA</b>	: Hydraulique Villageoise Améliorée
<b>INS</b>	: Institut National de la Statistique
<b>LSTE</b>	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
<b>MCD</b>	: Modèle Conceptuel de Données
<b>MERISE</b>	: Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise
<b>MLD</b>	: Modèle Logique des Données
<b>MLDR</b>	: Modèle Logique de Données Relationnelles
<b>MNT</b>	: Modèle numérique de terrain
<b>Mo</b>	: Mégaooctet
<b>MPD</b>	: Modèle Physique des Données
<b>NS</b>	: Niveau Statique
<b>OMD</b>	: Objectifs du Millénaire pour le Développement
<b>PMH</b>	: Pompe à Motricité Humaine
<b>PMS</b>	: Pompe à Motricité Solaire
<b>Po</b>	: Petaooctet
<b>PRICI</b>	: Projet de Renaissance des Infrastructures de Côte d'Ivoire
<b>PSE</b>	: Points de Servives en Eau

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>Pt</b>	: Profondeur Totale
<b>RGPH</b>	: Recensement Générale de la Population et de l'Habitat
<b>SGBD</b>	: Systèmes de Gestion de Bases de Données
<b>SGBDOO</b>	: Système de Gestion de Bases de Données Orienté Objet
<b>SGBDR</b>	: Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SIRS</b>	: Système d'Information à Référence spatiale
<b>SQL</b>	: Structured Query Langage
<b>To</b>	: Téraoctet
<b>UFR</b>	: Unité de Formation et de Recherche
<b>UJLoG</b>	: Université Jean Lorougnon Guédé
<b>Zo</b>	: Zettaoctet

## LISTES DES TABLEAUX

### LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Caractéristique du dictionnaire des données .....	52
<b>Tableau II</b> : Table descriptive de caractéristiques de la roche mère pour chaque formation géologique .....	73
<b>Tableau III</b> : Classification pour l'aptitude finale aux forages économiques .....	75
<b>Tableau IV</b> : Table département .....	85
<b>Tableau V</b> : Table sous-préfecture .....	85
<b>Tableau VI</b> : Table géophysique .....	86
<b>Tableau VII</b> : Table Village .....	86
<b>Tableau VIII</b> : Table équipement .....	86
<b>Tableau IX</b> : Table forage .....	87
<b>Tableau X</b> : Table paramètres chimiques .....	88
<b>Tableau XI</b> : Table comité de gestion .....	88
<b>Tableau XII</b> : Table Éssai de pompage .....	88
<b>Tableau XIII</b> : Table Piézométrie .....	89
<b>Tableau XIV</b> : Table parametres hydrodynamiques .....	89
<b>Tableau XV</b> : Table lithologie .....	89
<b>Tableau XVI</b> : Table prévision .....	90
<b>Tableau XVII</b> : Statistique des paramètres de forages .....	96
<b>Tableau XVIII</b> : Classe de transmissivité des différentes formations du socle .....	103
<b>Tableau XIX</b> : Matrice de corrélation .....	103
<b>Tableau XX</b> : Pourcentages et écart types des facteurs utilisés .....	104
<b>Tableau XXI</b> : Tableau des coordonnées des variables .....	104
<b>Tableau XXII</b> : Synthèse statistique .....	109
<b>Tableau XXIII</b> : Caracteristiques des variogrammes (logT) .....	110
<b>Tableau XXIV</b> : Validation croisée pour la transmissivité .....	110
<b>Tableau XXV</b> : Caracteristiques des variogrammes (logs') .....	111
<b>Tableau XXVI</b> : Validation croisée pour le coefficient d'emmagasinement .....	112
<b>Tableau XXVII</b> : Caracteristiques des variogramme (logQsp) .....	113
<b>Tableau XXVIII</b> : Validation croisée pour les débits spécifiques .....	113
<b>Tableau XXIX</b> : Distribution des villages PSE suivant le niveau d'adéquation du système d'approvisionnement en eau .....	132
<b>Tableau XXX</b> : Nombre d'ouvrages hydrauliques à réaliser aux horizons 2027 et 2032 .....	136

## LISTES DES TABLEAUX

**Tableau XXXI:** Planification de la réalisation des ouvrages d'AEP jusqu'à l'horizon 2032 141

## LISTES DES FIGURES

### LISTE DE FIGURES

<b>Figure 1</b> : Présentation de la zone d'étude .....	5
<b>Figure 2</b> : Carte du modèle numérique d'altitude (MNT) des départements de Yamoussoukro .....	7
<b>Figure 3</b> : Diagramme ombro-thermique de la station de Yamoussoukro 2020. (Source : Gnazalé, 2020) .....	8
<b>Figure 4</b> : Réseau hydrographique dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi .....	9
<b>Figure 5</b> : Ouvrages d'approvisionnement en eau .....	12
<b>Figure 6</b> : Carte géologique des départements de Yamoussoukro et Toumodi (Tagnini, 1971) .....	13
<b>Figure 7</b> : Evolution des bases de données.....	19
<b>Figure 8</b> : Les caractéristiques du variogramme. ....	26
<b>Figure 9</b> : Comportement à l'origine du variogramme .....	28
<b>Figure 10</b> : Répartition des forages sélectionnés sur la zone d'étude .....	36
<b>Figure 11</b> : Matériel de mesure de terrain .....	38
<b>Figure 12</b> : Étapes de la mise en place d'un dictionnaire de données <b>Erreur ! Signet non défini.</b> .....	
<b>Figure 13</b> : Représentation graphique du formalisme Entité-Relation.....	46
<b>Figure 14</b> : Symbole des éléments du schéma Entité-Relation .....	47
<b>Figure 15</b> : Exemple de clé primaire et secondaire .....	49
<b>Figure 16</b> : Schema traduisant le passage du MCD au MLDR .....	51
<b>Figure 17</b> : Table "FORAGE" en mode creation sous ACCESS .....	53
<b>Figure 18</b> : Table "FORAGE" en mode feuille de donnée.....	54
<b>Figure 19</b> : Schema conceptuel de la base de données géographique.....	57
<b>Figure 20</b> : Schema de synthèse de l'analyse de la productivité .....	66
<b>Figure 21</b> : Synthèse de la méthodologie pour la réalisation de forages économiques .....	76
<b>Figure 22</b> : Construction des polygones de Thiessen (Bossier, 2013) .....	78
<b>Figure 23</b> : Découpage en polygone de Thiessen (Bossier, 2013) .....	79
<b>Figure 24</b> : Modèle Conceptuel de Données .....	83
<b>Figure 25</b> : Exemple de relation (1 à plusieurs) entre certaines tables de la base de données réalisé sous ACCESS .....	91
<b>Figure 26</b> : Interface de la base de données relationnelle sous ACCESS .....	92
<b>Figure 27</b> : Exemple de requete sur le logiciel ArcGiS.....	93

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 28</b> : Carte de repartition spatiale des débits. ....	97
<b>Figure 29</b> : Distribution des débits en fonction des classes .....	98
<b>Figure 30</b> : Relation entre AE et profondeur des forages dans le socle .....	99
<b>Figure 31</b> : Productivité dans le socle .....	99
<b>Figure 32</b> : Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altération .....	100
<b>Figure 33</b> : Evolution des débits en fonction des profondeurs totales des forages .....	101
<b>Figure 34</b> : Evolution des débits en fonction de la lithologie.....	102
<b>Figure 35</b> : Relation entre transmissivité et débit de forages .....	102
<b>Figure 36</b> : Cercle de caummunauté des plan factoriel F1-F2 et F1-F3.....	105
<b>Figure 37</b> : Transmissivité.....	106
<b>Figure 38</b> : Droite d'Anderson-Darling (T) .....	106
<b>Figure 39</b> : Coefficient d'emmengasinement .....	107
<b>Figure 40</b> : Droite d'Anderson-Darling (S').....	107
<b>Figure 41</b> : Débit spécifique et fréquence .....	108
<b>Figure 42</b> : Droite d'Anderson-Darling (Qsp) .....	108
<b>Figure 43</b> : Ajustement aux modèles .....	109
<b>Figure 44</b> : Ajustement aux modèles.....	111
<b>Figure 45</b> : Ajustement aux modèles.....	112
<b>Figure 46</b> : Carte d'estimation de la transmissivité .....	114
<b>Figure 47</b> : Carte de l'erreur d'estimation de la transmissivité .....	115
<b>Figure 48</b> : Carte d'estimation du coefficient d'emmengasinement.....	116
<b>Figure 49</b> : Carte de l'erreur d'estimation du coefficient d'emmengasinement.....	117
<b>Figure 50</b> : Carte d'estimation du débit spécifique .....	118
<b>Figure 51</b> : Carte de distribution des erreurs d'estimation des Qsp.....	119
<b>Figure 52</b> : Carte de l'aptitude géologique à la réalisation de forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi. ....	123
<b>Figure 53</b> : Carte de distribution des profondeurs des arrivées d'eau dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi .....	124
<b>Figure 54</b> : Carte de profondeurs estimées de l'eau dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi .....	125
<b>Figure 55</b> : Carte de l'aptitude hydrogéologique à la réalisation des forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi.....	126
<b>Figure 56</b> : Carte des zones favorables aux forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi .....	127

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 57 :</b> Couverture spatiale des forages .....	129
<b>Figure 58:</b> Typologie des infrastructures villageoises d'accès à l'eau potable .....	130
<b>Figure 59:</b> Pompe à motricité humaine .....	130
<b>Figure 60 :</b> Pompe à motricité solaire .....	131
<b>Figure 61 :</b> Hydraulique villageoise améliorée .....	131
<b>Figure 62 :</b> Etat d'adéquation des équipements d'hydraulique humaine .....	133
<b>Figure 63 :</b> Nombre de personnes par point de service d'eau.....	133
<b>Figure 64 :</b> Distribution de la population par point de service d'eau .....	134

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'eau est vitale pour le développement humain. Tout le monde en a besoin et il n'existe pas d'activités socio-économiques qui n'en dépendent d'une manière ou d'une autre. Comme le font remarquer Dovonou *et al.* (2022), la vie sur terre n'est possible que grâce à l'existence de certaines ressources vitales dont l'eau, denrée de grande importance pour les êtres vivants. C'est la raison pour laquelle l'homme s'est toujours donné les moyens pour réajuster ses comportements en fonction de la disponibilité de cette ressource dans son environnement. Toutefois, l'eau n'est pas suffisamment abondante et sa qualité laisse à désirer pour beaucoup d'habitants de la planète, qui pâtissent en outre des perturbations liées aux inondations et sécheresses (OCDE, 2011).

L'Afrique, comme beaucoup d'autres régions du monde telles que l'Amérique du Sud, l'Australie et l'Inde, est un continent qui se fonde intensivement sur les ressources d'eau souterraines pour sa consommation (Konan-Waidhet *et al.*, 2010) et ceci à travers des forages, les puits et les sources. Malgré l'apparente abondance des milieux aquatiques de notre planète, la part de cette eau utile à l'homme, l'eau douce, y est rare et très inégalement répartie (SMBO, 2010). L'Afrique subsaharienne a le taux d'accès à l'eau potable et à l'assainissement le plus faible du monde. Seul 47 % de la population rurale contre 81 % de la population urbaine ont accès à l'eau potable (CTB, 2009).

A la lumière d'une enquête menée par Afrobaromètre (2017), le problème de l'eau constitue la troisième préoccupation des populations après le chômage et la pauvreté en Côte d'Ivoire. En effet, 43% de la population en milieu rural et 57% en milieu urbain n'ont pas accès à cette ressource.

C'est pourquoi l'Etat ivoirien multiplie à travers le pays des programmes d'adduction en eau potable à partir des forages (Diabagaté, 2019). En effet, au titre de l'année 2019 c'est deux mille six cent soixante cinq (2 665) Pompes à Motocité Humaines (PMH) qui ont été réhabilitées sur l'ensemble du territoire.

Malgré ces efforts, de nombreuses localités ont des difficultés d'accès à l'eau potable (Soro *et al.*, 2010) dans les contrées rurales des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Cette situation de faible desserte serait due à l'insuffisance des points d'eau potable qui n'évoluent pas en fonction de la croissance démographique ; la vétusté et la dégradation des ouvrages existants (Sorokoby *et al.*, 2010) ou l'inégale répartition des forages (Laure, 2018).

Par conséquent, l'accessibilité à cette ressource devient un calvaire pour les populations. Cette situation entraîne des pénuries pouvant perdurer jusqu'à plusieurs semaines occasionnant parfois des conflits au sein des populations.

## INTRODUCTION

Puisque l'accès à l'eau reste étroitement lié aux objectifs du développement durable, il convient de mettre en place des stratégies de planification et de gestion rationnelle de la ressource pour les populations rurales. Ces stratégies permettront de satisfaire de manière prioritaire les besoins en infrastructures d'adduction en eau potable des populations.

Cependant, dans ces départements comme presque partout en Côte d'Ivoire, les données originelles d'autres projets restent difficiles à obtenir voire impossible (Sorokoby *et al.*, 2010). Il manque souvent les informations concernant le recueil des données ont été récoltées et avec quelles hypothèses celles-ci ont été traitées et interprétées. Enfin, les données restent difficiles à mettre à jour. Or tout programme de gestion, planification et de développement est basé sur des informations bien structurées, organisées et bien regroupées de sorte à ce que les éléments prépondérants soient mis en évidence (Lebreton, 2000) pour des prises de décisions fiables. Si le rapport de la coopération pour le développement de l'OCDE (2017) a eu pour thème le rôle des données pour le développement, c'est parce que les données de qualité, à jour et ventilées indispensables pour atteindre la finalité ultime du développement, à savoir améliorer le bien-être des peuples et combattre la pauvreté, ne sont pas disponibles. Une analyse critique pourra alors être effectuée pour arriver à des conclusions utiles au développement durable.

Les progrès dans le domaine des communications facilitent la mise en place des systèmes de collecte, d'analyse et de diffusion de l'information. Aussi, les systèmes d'informations géographiques (SIG), permettent d'élaborer un outil d'appui à la décision utile pour la planification et à la gestion des ressources naturelles (Faurès, 2003).

La gestion du territoire par les nouvelles technologies de l'information, a déjà fait l'objet de travaux réalisés par des auteurs à travers le monde (Bocquet et Leonard, 2000 ; Allain, 2001 ; Martin, 2002 ; El Morjani *et al.*, 2003 ; Boker, 2005 ; RiahiChandoul *et al.* 2008 ; Fatiha *et al.*, 2012).

En Côte d'Ivoire, en matière de SIG, de nombreux travaux ont déjà été réalisés dans la gestion des ressources du territoire (Biémi *et al.*, 1998 ; Kouamé, 1999 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Moussa, 2006 ; Konan-Waidhet, 2007 ; Coulibaly, 2009).

En ce qui concerne les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, des études ont été menées. Il s'agit notamment de, l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines réalisés par Soro (2010), la caractérisation hydrodynamique des aquifères fissurés est l'œuvre de Ehoussou *et al.* (2018). La géologie a été suffisamment étudiée par Faillat et Leblond (1982), de Leblond (1984) et de N'guessan (1985) qui ont permis de comprendre le fonctionnement des aquifères de fissures.

## INTRODUCTION

Il ressort de l'analyse des études effectuées, qu'aucun de ces travaux n'a véritablement mis l'accent sur la mise en œuvre d'un véritable outil pour la gestion intégrée des ressources en eau en vue de valoriser les données hydrogéologiques de ces départements. Ainsi, une question mérite d'être posée : l'emploi d'outils appropriés permettant le stockage, l'analyse et la mise à jours de données de forages diversifiées, permettrait-il d'accéder facilement et rapidement aux informations ?

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude dont le thème est : Elaboration d'une base de données liée aux forages et analyse géospatiale par Système d'Information Géographique : cas des départements de Yamoussoukro et de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire).

L'objectif principal de cette étude vise à développer un outil d'aide à la décision pour une bonne gestion de la desserte en eau potable des populations. Pour atteindre ce résultat, un certain nombre d'objectifs spécifiques a été fixé :

- Concevoir une base de données à référence spatiale sur les forages ;
- faire une analyse statistique des paramètres de productivité des forages ;
- déterminer les zones potentiellement favorables à l'implantation de forages économiques ;
- optimiser la desserte en eau potable dans les zones rurales des départements de Yamoussoukro et Toumodi.

Ce mémoire a été subdivisé en trois (3) parties qui se présentent comme suit :

- la partie I traite des généralités concernant le secteur d'étude. Les différents aspects géographiques, physiographiques, hydro climatiques, géologiques et hydrogéologiques y sont abordés ;
- la partie II présente les différentes données, le matériel et les méthodes utilisées pour la réalisation de cette étude ;
- la partie III analyse les principaux résultats obtenus, suivie de la discussion.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui fait la synthèse des principaux résultats suivis des recommandations, des perspectives et des références bibliographiques.

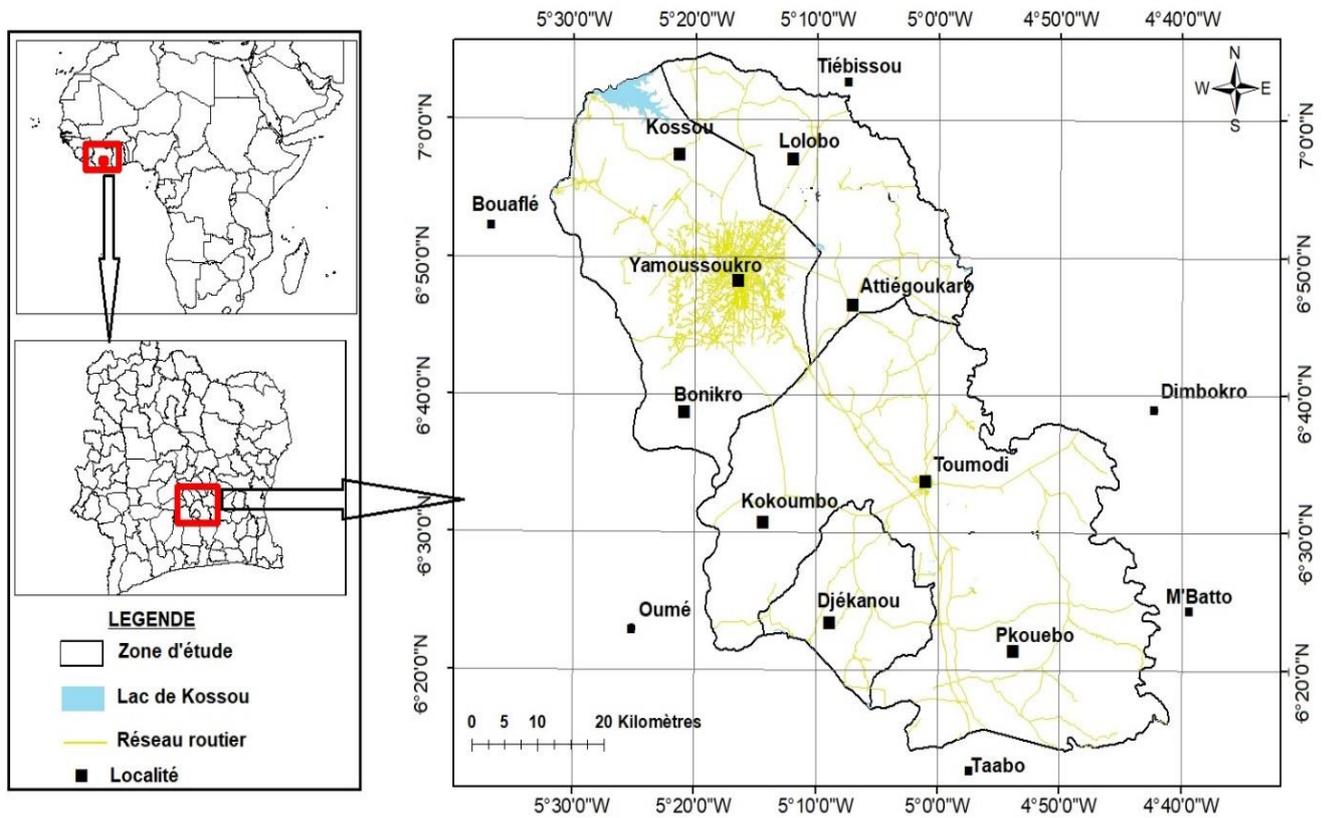
# **PARTIE I : GENERALITES**

**CHAPITRE 1 : Contexte environnemental, géologique et hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi.**

**1.1 Contexte environnemental**

**1.1.1 Localisation de la zone d'étude**

La zone d'étude comprend les départements de Yamoussoukro et Toumodi (Figure 1). Elle englobe les sous-préfectures de Kpouébo, d'Angonda, de Bonikro, de Kossou, de Lolobo, d'Attiegouakro, de Kokoumbo, de Djekanou, de Yamoussoukro et de Toumodi. Ces départements sont situés au Centre de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 4°39' et 5°32'W et les latitudes 6°05' et 7°09'N. Ils partagent également des frontières administratives avec les départements de Bouaflé et d'Oumé à l'Ouest, Dimbokro et M'batto à l'Est, Didievi et Tiébissou au Nord et Taabo au Sud. Cette zone s'étend sur une superficie de 4 789,38 km<sup>2</sup>.



**Figure 1 : Présentation de la zone d'étude**

**1.1.2 Caractéristiques physiques de la zone d'étude**

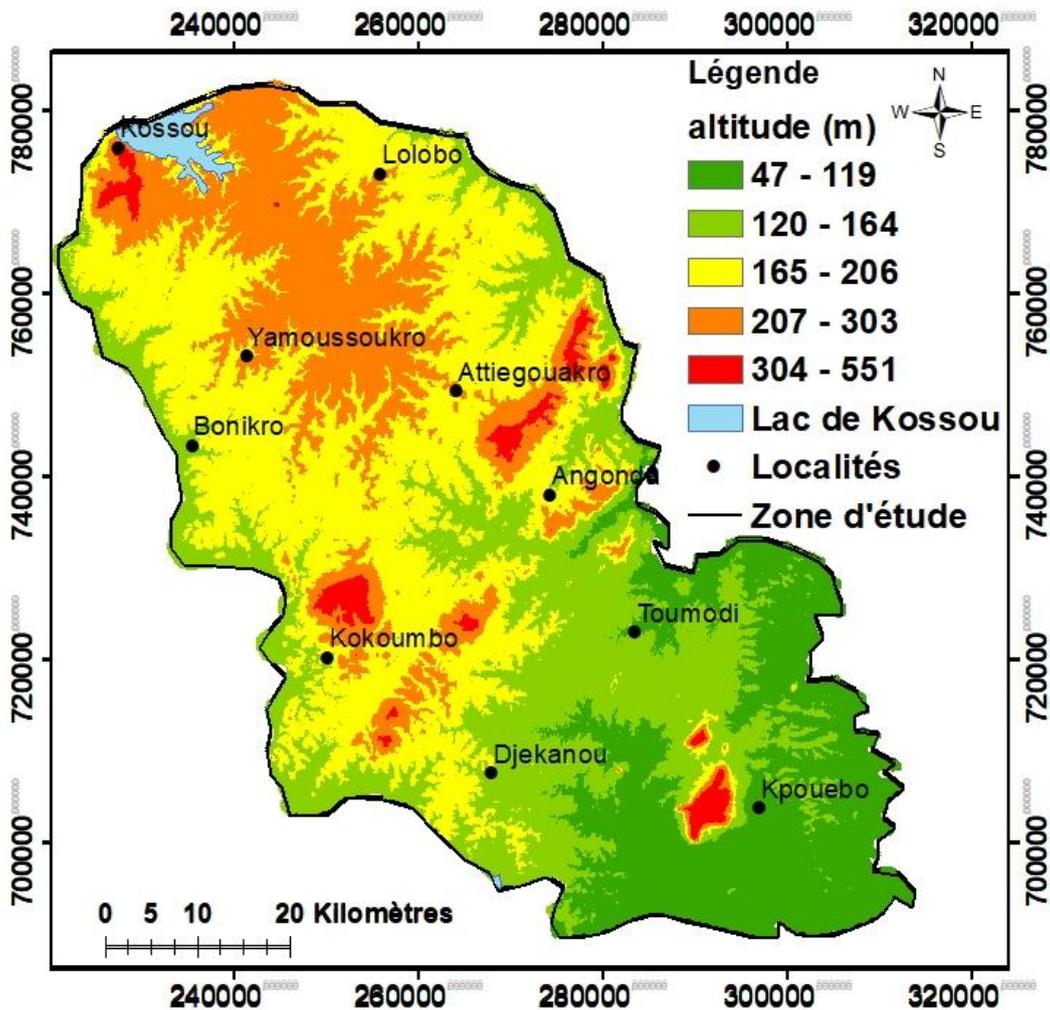
**1.1.2.1 Relief**

Le relief de la zone d'étude est peu vallonné et correspond aux plateaux de la zone de savane arborée (Anonyme, 2014). Cette zone est une large pénéplaine entourée la chaîne de Fétékro au Sud Est, qui culminent respectivement à 623 m à l'Ouest du barrage de Kossou et à 646 m au Sud Est de Yamoussoukro (Leblond, 1984). L'altitude moyenne dans ces départements est de

## GENERALITES

200 m, la plaçant ainsi à la limite méridionale de la zone dite « des plateaux » (200 et 500 m). Les altitudes les plus élevées sont voisines de 240 m. En somme, le paysage est constitué d'un ensemble de collines à profil peu élevé, séparé par des vallées peu profondes avec des versants ayant de faibles pentes : l'amplitude maximum des reliefs y est de l'ordre d'une cinquantaine de mètres et la pente moyenne est rarement supérieure à 4 %. Sur ce plateau, le réseau hydrographique dessine des interfluves de formes diverses plus ou moins régulières et de tailles variables. Les interfluves jouent un grand rôle dans l'occupation des sols. En effet, les villages sont bâtis sur les collines et les plateaux et l'on rencontre les puits traditionnels et les puisards dans les thalwegs. Le relief de la zone d'étude est mis en évidence par un modèle numérique d'altitude (MNT) acquis en format Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et fourni par un site Internet américain (<ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>) (figure 2). Le MNT a une résolution de 30 m. Une analyse du MNT de la figure 2 montre que le relief de la zone est peu accidenté confirmant ainsi les analyses faites ultérieurement par Léblond (1984). Toute la zone est dominée par les altitudes de 100 à 200 m et 200 à 300 m. Cependant, cette monotonie est perturbée en quelques endroits. Dans la partie Est de la zone, on rencontre la chaîne des collines de Fêtékro d'orientation SSO-NNE. C'est le domaine des hauts plateaux. De même au Sud du barrage de Kossou, on trouve des altitudes supérieures à 600 m. On remarque donc que la zone d'étude est caractérisée par une monotonie des reliefs. Cette monotonie va favoriser une stagnation des eaux qui auront tendance à s'infiltrer et/ou s'évapotranspirer selon les conditions de perméabilité du substratum et l'intensité des activités évapotranspiratoires (Kouassi, 2007). Ce relief est présenté par la figure 2.

## GENERALITES

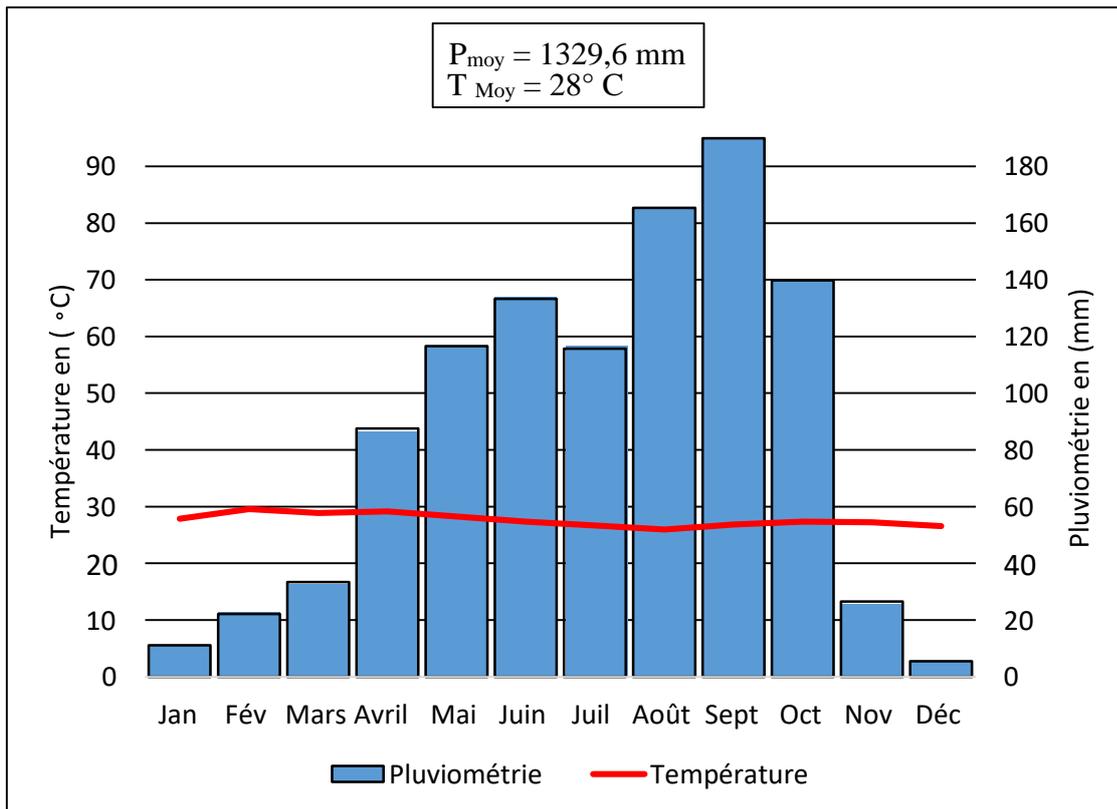


**Figure 2 :** Carte du modèle numérique d'altitude (MNT) des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

### 1.1.2.2 Climat

Le régime climatique des départements de Yamoussoukro et Toumodi est un régime équatorial humide atténué ou climat Baouléen. Il est caractérisé par une saison sèche qui part de novembre à mi-mars et une saison de pluies, de mi-mars à fin octobre. Les précipitations annuelles sont comprises entre 900 et 1600 millimètres (mm) de pluie par an (figure 3). Les précipitations mensuelles, quant à elles, sont marquées pour la plupart par deux maximas pluviométriques dont l'un en Juin et l'autre en septembre. La température moyenne interannuelle de ces départements (Yamoussoukro et Toumodi) est d'environ 28 degré celsius (°C). La période la plus chaude de l'année dans cette partie du pays est le premier trimestre (janvier à mars), tandis que la période la moins chaude est le bimestre août-septembre (Akmel, 2013 ; N'guessan *et al.*, 2014).

## GENERALITES

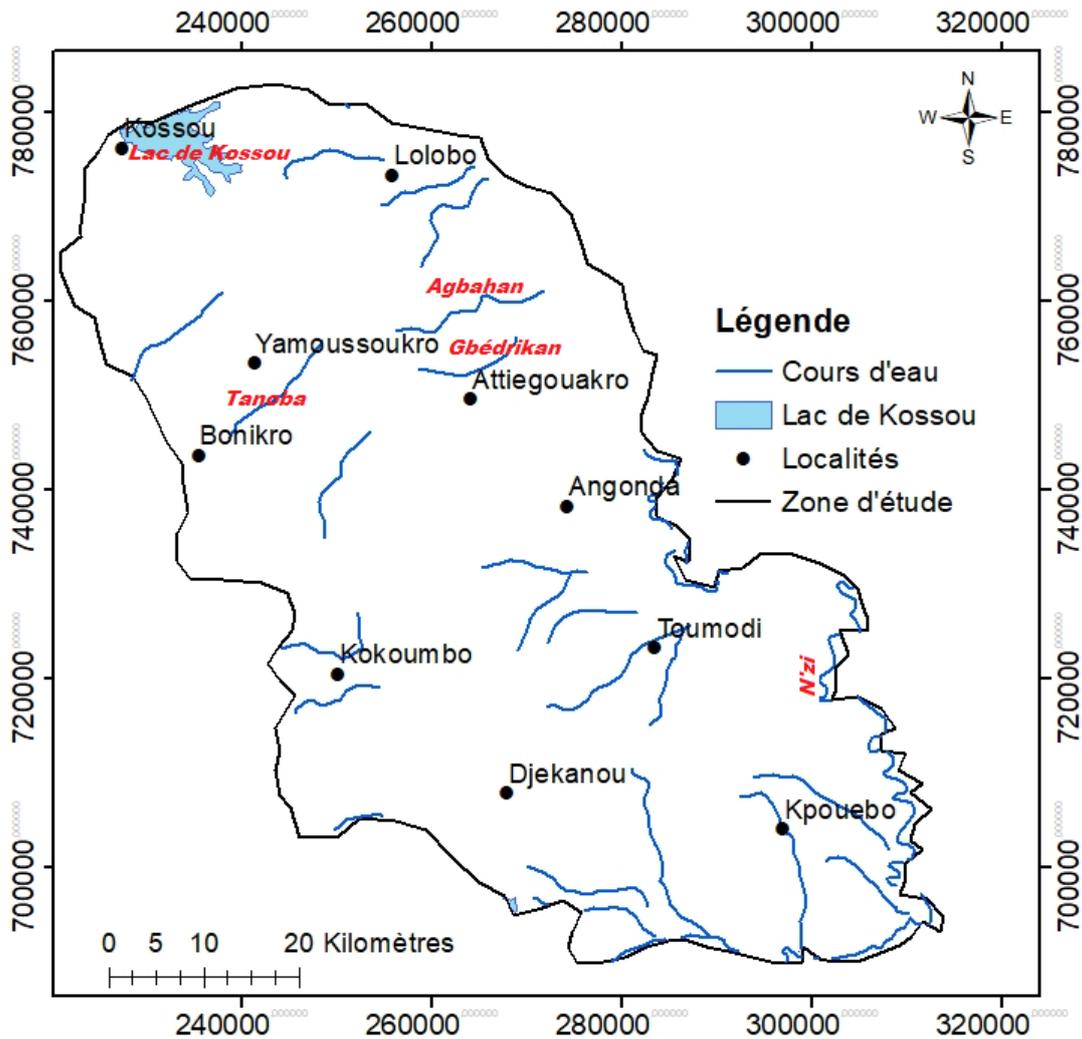


**Figure 3 :** Diagramme ombro-thermique de la station de Yamoussoukro (2000 - 2020) (Source : Gnazalé, 2020)

### 1.1.2.3 Hydrographie

Le réseau hydrographique essentiellement composé du fleuve Marahoué (ou Bandama blanc) et du N'Zi, deux affluents du Bandama (figure 4). Sur ces affluents, l'on trouve de nombreux barrages hydroagricoles et un barrage hydroélectrique (le barrage de Kossou), construit sur le Bandama blanc et situé dans l'extrême Nord-Ouest de la région. Il existe quelques cours d'eau permanents tels que le Kpoussouba qui traverse les villages de Kpoussoussou et de Soubiakro. Le Tanoba coule à proximité de Zambakro. Le Kloglo et le Raret côtoient le village de Kacoubroukro. L'Agbahan, et le Gbédrikan quant à eux, coulent dans la localité d'Attiégouakro. Les rivières qui composent ces départements ont un régime irrégulier. Toutefois, le lac Kossou, le Kan et le Praha (deux affluents du N'Zi) se distinguent par leur étendue. La ville de Yamoussoukro et ses environs comptent une trentaine de lacs qui jouent un rôle structurant de la capitale politique. Aménagés pour la plupart, ces lacs connaissent une eutrophisation et une pollution avancées du fait des activités humaines (Akmel, 2013).

## GENERALITES



**Figure 4** : Réseau hydrographique dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi

### 1.1.2.4 Végétation

La végétation de cette partie de la Côte d'Ivoire est dominée par la savane pré-forestière, parsemée plus ou moins de petits arbres et entrecoupée de bosquets et d'îlots forestiers. Ce paysage végétal est celui d'une zone de contact entre la forêt et la savane. Des galeries forestières occupent les bas-fonds et le long des cours d'eau. Sur les sols sableux, apparaissent des peuplements de rôniers et de palmiers. La trame est faite d'une prairie à hautes herbes piquetées par endroits de quelques arbres (Akmel, 2013 ; N'guessan, 2014). Elle compte dix (10) forêts classées d'environ 40.000 hectares (ha), dont celle de Rumbo Boka, de Mando et de Bodio par exemple (Akmel, 2013).

### 1.1.2.5 Sols

Les sols de ces deux départements appartiennent à la catégorie des sols ferralitiques moyennement désaturés au Nord et à celle des sols ferralitiques fortement désaturés au Centre

## GENERALITES

et au Sud (CPCS, 1967). Toutefois, on rencontre des sols hydromorphes et peu évolués au bas des pentes et dans les bas-fonds et des sols de type ferrugineux tropical. Depuis 2013, un atlas des sols d'Afrique a été réalisé par Jones *et al.* (2013) et est basé sur le système de classification de la base de référence mondiale pour les ressources en sols. Ainsi, dans cet atlas, on distingue dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi des plinthosols pisoplinthiques (45 %), des lithosols pétriques (26 %), des acrisols plinthiques (11 %), des cambisols ferraliques (6 %).

### **1.1.3 Environnement humain et socio-économique**

L'influence anthropique sur le réseau hydrographique de la zone d'étude est très importante du fait de la construction du barrage hydroélectrique de Kossou sur le Bandama et l'aménagement de nombreuses retenues d'eau sur ses affluents. Ces différents aménagements ont pu favorisé l'amélioration des conditions de vie des populations riveraines, aussi, ont provoqué un changement dans le régime des cours d'eau. Tout ceci peut entraîner une forte prévalence de certaines maladies hydriques.

#### **1.1.3.1 Environnement humain**

La zone d'étude fait partie de l'aire traditionnelle des Baoulés qui sont un sous-groupe des Akan. On distingue quatre tribus : les Akouê, les Nanafouê, les N'zikpli, les Ngban. A côté de cette population autochtone, on note la présence de populations d'origines diverses. Avec une population urbaine d'environ 627716 habitants, le taux d'urbanisation dans ces départements est de 55 % contre 45 % de population vivant en milieu rural. Le taux d'accroissement annuel observé sur la période de 2014-2021 est de 2,6% (INS, 2021). Celui-ci pourrait augmenter considérablement avec le transfert effectif de la capitale administrative et politique. Du point de vue des infrastructures routières, l'on peut dire que ces départements sont très bien fournis avec les grands axes qui sont tous bitumés et de nombreuses pistes carrossables qui sont relativement en bon état. La présence de la Basilique Notre Dame de la Paix, des lacs et du parc animalier d'Abokouamékro constitue des pôles d'attraction pour les touristes.

#### **1.1.3.2 Environnement socio-économiques**

##### **1.1.3.2.1 Agriculture**

La région des Lacs est une zone agricole à l'instar des autres régions du pays. L'agriculture représente l'activité économique la plus importante. Les investissements réalisés ont été particulièrement importants par des aménagements hydro-agricoles contribuant ainsi à un développement de la riziculture. La superficie totale aménagée en riziculture annuelle est

## GENERALITES

estimée à 2 260 hectares (Soro, 2010). L'activité agricole est assez variée : café, cacao, différentes cultures vivrières (igname, maïs, riz irrigué, manioc, banane plantain, etc....), maraîchères (carotte, salade, etc....) et des légumes (tomate, gombo, etc....) (Soro, 2010). Toute cette dynamique a pour conséquence l'augmentation drastique des besoins en eau à tous les niveaux. La recherche de nouvelles ressources en eau en quantité et en qualité s'avère être primordiale afin de subvenir à tous ces besoins.

### **1.1.3.2.2 Elevage et ressources halieutiques**

A l'instar des autres régions de la Côte d'Ivoire, un certain nombre de projets de développement de l'élevage ont été mis en œuvre dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi et particulièrement dans la sous-préfecture de Yamoussoukro. Globalement, ces projets ont impulsé à l'élevage, un rythme de croissance soutenu. Il s'agit :

- du Ranch d'Abokouamékro, créé en 1962 et qui a constitué le point de départ du développement de l'élevage ivoirien. Ce ranch est aujourd'hui transformé en parc animalier ;
- de Projet SODEPRA-CENTRE, démarré en 1976, a permis l'encadrement de nombreux éleveurs de la région. Il en est de même pour le projet de développement de l'élevage phase II. A côté de ces projets d'élevage, on note aussi un développement des ressources halieutiques.

En effet, la région des lacs dispose d'importantes retenues hydro-agricoles et d'un barrage hydroélectrique couvrant des milliers d'hectares en plan d'eau stable et facilement aménageable pour la pêche. L'exploitation du plan d'eau du barrage hydroélectrique estimé à 15 000 hectares produit plus de 1000 tonnes de poissons frais par an. A cela, il convient d'ajouter les 60 retenues d'eau à vocation hydro-agricoles disséminés dans la région et dont les caractéristiques générales de plans d'eau sont favorables à la pêche (Soro, 2010).

### **1.1.3.2.3 Tourisme**

Les départements de Yamoussoukro et de Toumodi regorgent d'importants sites et attractions touristiques. Toutes ces potentialités font de cette région l'une des principales destinations touristiques du pays. En outre, l'aéroport international de Yamoussoukro constitue la porte d'entrée de nombreux touristes. Parmi ces nombreux sites on peut citer entre autres, la réserve de faune d'Abokouamékro avec plus de 20 430 hectares ; la Basilique Notre Dame de la Paix ; la fondation Félix Houphouët-Boigny pour la recherche de la « paix » ; les lacs aux crocodiles et le barrage hydro-électrique de Kossou.

#### 1.1.3.2.4 Approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau potable des populations des départements de Yamoussoukro et Toumodi est assuré à la fois par les eaux de surface et souterraines. Les grandes agglomérations (villes et les gros villages) sont alimentées par des eaux de surface au travers de retenues d'eau AEP. Les sous-préfectures et certaines localités de ces sous-préfectures bénéficient des systèmes d'Hydraulique Villageoise Améliorée (HVA) (Figure 5a et figure 5b). Quant aux zones rurales, elles sont alimentées en eau potable à partir des eaux souterraines par des forages des programmes d'Hydraulique Villageoise (HV) et aussi par des puits traditionnels creusés manuellement (Figure 5c et figure 5d).



**Figure 5** : Ouvrages d'approvisionnement en eau

a : Château à Djékanou, b : HVA à Lomo Nord, c : PMH à Koffikro, d : Puits à Apkessekro

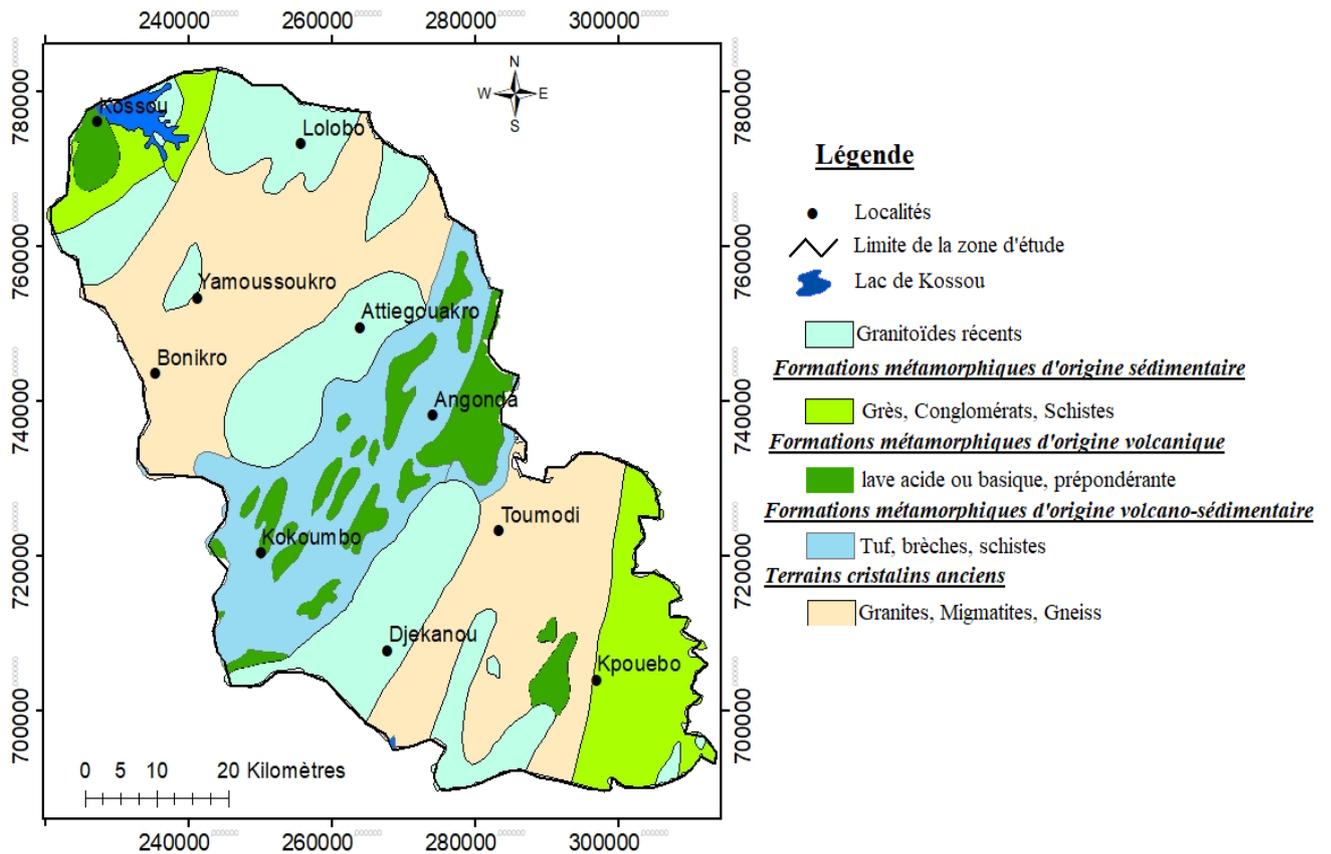
## 1.2 Contexte géologique et hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

### 1.2.1 Aperçu géologie des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

Du point de vue géologique, les départements de Yamoussoukro et de Toumodi appartiennent au domaine Baoulé-Mossi du craton Ouest africain. Les roches rencontrées dans ces départements sont généralement constituées de granitoïdes, de roches vertes, de roches volcano-sédimentaires et des schistes (Yacé, 1976) (Figure 6). Parmi les granitoïdes, on distingue les granites et les granodiorites qui constituent le socle de la région de Toumodi. On les retrouve à Abokouamékro où elles se présentent en dômes massifs de direction N 65°. Ces dômes dans

## GENERALITES

leur ensemble, présentent une linéation de direction N 10°. Les roches vertes sont constituées des metabasaltes, des pillowlavas et des métagabbros qui sont peu altérés. Les roches métamorphiques sont constituées d'une série de schistes noirs. Les roches volcano-sédimentaires se composent des métabrèches à amphiboles et des métaconglomérats qui sont constitués de poudings et brèches consolidées par un ciment de nature sédimentaire. Les roches volcaniques sont constituées d'une part de roches issues d'une coulée de lave (exemple : basaltes) et sont cristallisées en petits cristaux (microlithes), avec des fentes de retrait (refroidissement rapide) et des vacuoles. Ces formations ont une porosité et une perméabilité de fracture en plus des joints de stratification. D'autre part, on a les roches issues d'une projection volcanique (exemple : tufs volcaniques) qui sont des roches meubles ou consolidées, souvent mal cristallisées (refroidissement très rapide, parties amorphes), stratifiées. Les roches sédimentaires ont une grande porosité et aussi une bonne perméabilité. Ce sont des roches meubles en accumulation instable facilement érodables (cendres volcaniques) et roches consolidées plus rigides (ignimbrites) pouvant servir de pierres de construction (Andes).



**Figure 6:** Carte géologique des départements de Yamoussoukro et Toumodi (Tagnini, 1971)

### **1.2.2 Aperçu hydrogéologique des départements de Yamoussoukro et de Toumodi**

Les différentes études réalisées dans ces départements sont celles de Guerin-Villaubreuil (1962) ; Leblond (1984) ; N'guessan (1985) et Faillat (1986). Ces auteurs ont noté dans ces départements, l'existence d'aquifères composite qui sont captés par les différents ouvrages existants dans la zone d'étude.

#### **1.2.2.1 Aquifère des altérites**

C'est un aquifère qui a une porosité totale d'interstice élevée mais avec une faible porosité efficace et une très faible perméabilité. Les zones les plus perméables se trouvent soit en surface, soit dans la masse des altérites (lentilles sableuse) soit dans la transition existante au contact altérites socle (Yacé, 2002). Du fait de leur teneur élevée en minéraux argileux, ces terrains fournissent des eaux de qualité médiocre et des débits très peu élevés de 1,3 m<sup>3</sup>/h en moyenne avec exceptionnellement 10 m<sup>3</sup>/h, pour des rabattements de 2 à 6 m (Yacé, 2002). Il fut pourtant le premier aquifère à être utilisée par les autorités ivoiriennes pour l'alimentation en eau des villages par le biais de puits modernes d'au moins 1m de diamètre jusqu'en 1975 (Yacé, 2002). De nombreux puits villageois qui captent ces altérites existent dans les bas-fonds où le niveau de l'eau se situe, fréquemment, entre 1 m et 2 m sous le sol. Ces puits subissent l'influence des saisons. Ainsi, pour faire face à cette situation et aussi au risque élevé de contamination de ces ouvrages, les techniciens forent plus en profondeur à l'aide de nouveaux moyens techniques (Soro, 2010).

#### **1.2.2.2 Aquifère de fissures**

Il est capté par des forages qui sont des ouvrages à petit diamètre grâce à l'avènement de la technique du marteau fond-de-trou dans la recherche des eaux souterraines en milieu de socle. Cet aquifère a une bonne perméabilité dans les zones à forte densité de fracturation. La transmissivité est très inégale d'un point à un autre du fait des variations très rapides de l'épaisseur de la zone fracturée. Le débit moyen calculé par Leblond (1984) est de l'ordre de 3,5 m<sup>3</sup>/h dans les granitoïdes aux environs de Yamoussoukro pour un rabattement moyen de 24 m environ. Le niveau statique moyen se situe vers 12 m sous le sol avec des valeurs extrêmes de 0 à 20 m. Actuellement c'est l'aquifère le plus exploité pour l'alimentation en eau potable dans le cadre de l'Hydraulique Villageoise et de l'Hydraulique Villageoise Améliorée.

### **Conclusion partielle**

Les départements de Yamoussoukro et Toumodi avec une population de 627.716 habitants est caractérisé par des pédiplaines avec des versants quasi-rectilignes, des bas-fonds plats et des chaînes de montagnes granitiques très aplaties et peu élevées dont l'altitude moyenne tourne autour de 200 m. Le climat est de type tropical humide dont une saison pluvieuse et une saison sèche. La hauteur moyenne annuel de la pluviométrie annuelle est proche de 1200 mm. Les sols ferrallitiques sont les plus abondantes dans ces départements sur lesquels on a une végétation constituée de forêt mésophile, de forêts galeries, de savanes arbustives ou de savanes à rôniers. Le fleuve Bandama et ses affluents constituent l'essentiel du réseau hydrographique. D'autres cours d'eau tels que la rivière Kan, la rivière Bomba alimentent la zone. Au plan géologique, ces départements sont situés dans le domaine paléoproterozoïque plus précisément Birrimien de la Côte d'Ivoire. Les roches de cette zone sont d'origines magmatiques et métamorphiques. Elles sont essentiellement constituées de granites à biotite, granites à deux micas, migmatites, granodiorites concordants, pegmatites de schistes, de quartzites et de roches vertes. Quant au système aquifère de ces départements, il est composite (réservoirs des altérites et les réservoirs fracturés).

Dans le prochain chapitre, les différentes thématiques en rapport avec le sujet seront abordées.

## **CHAPITRE 2 : Etat des connaissances sur les bases de données, les systèmes d'information géographique, les aquifères et l'analyse spatiale**

Les bases de données ont pris aujourd'hui une place essentielle dans l'informatique, plus particulièrement dans le domaine de la gestion. Au cours des trente dernières années, des concepts, méthodes et algorithmes ont été développés pour gérer des données. Ils constituent aujourd'hui l'essentiel de la discipline « Bases de Données » (BD). Cette discipline est utilisée dans de nombreuses applications. Il existe un grand nombre de Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) qui permettent de gérer efficacement de grandes bases de données. Les bases de données constituent donc une discipline qui offre de nombreux débouchés pratiques dans les services numériques, l'e-commerce, dans la recherche, les métiers du Web ou encore le domaine de la banque et des assurances (Younes, 2008).

### **2.1 Généralités sur les bases de données**

#### **2.1.1 Définition**

Une base de données, généralement appelée BD est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données) et accessibles de façon sélective par plusieurs utilisateurs (Kölling, 1999). La gestion et l'accès à une base de données sont assurés par un ensemble de programmes qui constituent le Système de Gestion de Base de Données (SGBD). Un SGBD héberge généralement plusieurs bases de données, qui sont destinées à des logiciels différents ou des thématiques différentes.

#### **2.1.2 Objectifs de la base de données**

Les Bases de Données ont pour objectifs le partage de l'information et l'organisation des données indépendamment des programmes.

##### **2.1.2.1 Partage de l'information**

Une base de données permet le partage d'un ensemble unique d'informations par plusieurs utilisateurs. Cependant, il faut que cette mise en commun soit faite tout en préservant la vue particulière que chaque utilisateur peut avoir des informations, et en s'assurant que la simultanéité des traitements qui peuvent être effectués ne risque pas de dégrader l'intégrité de la base de données.

### **2.1.2.2 Organisation des données indépendamment des programmes**

Afin de construire un ensemble d'informations structurées non redondant et qui soit partageable par plusieurs utilisateurs, il est nécessaire de faire abstraction des traitements particuliers de tel ou tel utilisateur (ou programme) pour tenter d'organiser les informations en fonction de leur nature et des liens réels qui existent entre elles. C'est de cette manière qu'on arrivera à garantir le maximum d'indépendance entre données et programmes.

### **2.1.3 Historique des SGBD**

Les SGBD ont aujourd'hui soixante ans d'histoire. Les années 60 ont connu un premier développement des bases de données sous forme de fichiers reliés par des pointeurs (Carlos *et al.*, 2012). Les fichiers sont composés d'articles stockés les uns à la suite des autres et accessibles par des valeurs de données appelées clés. Les systèmes IDS.I et IMS.I développés respectivement à Honeywell et à IBM vers 1965 pour les programmes de conquête spatiale, notamment pour le programme APOLLO qui a permis d'envoyer un homme sur la lune, sont les précurseurs des SGBD modernes (Aho *et al.*, 1979). Ils permettent de constituer des chaînes d'articles entre fichiers et de parcourir ces chaînes. Les premiers SGBD sont réellement apparus à la fin des années 1960. La première génération de SGBD est marquée par la séparation de la description des données et de la manipulation par les programmes d'application. Elle coïncide aussi avec l'avènement des langages d'accès navigationnels, c'est-à-dire permettant de se déplacer dans des structures de type graphe et d'obtenir, un par un, des articles de fichiers (Muller, 1998). Cette première génération, dont l'aboutissement est marqué par les recommandations du CODASYL, est basée sur les modèles réseau ou hiérarchique, c'est-à-dire des modèles de données organisés autour de types d'articles constituant les nœuds d'un graphe, reliés par des types de pointeurs composant les arcs du graphe. Cette génération a été dominée par les SGBD TOTAL, IDMS, IDS 2 et IMS 2. Elle traite encore aujourd'hui une partie importante du volume de données gérées par des SGBD. La deuxième génération de SGBD a grandi dans les laboratoires depuis 1970, à partir du modèle relationnel (Rissanen, 1999). Elle vise à enrichir mais aussi à simplifier le SGBD externe afin de faciliter l'accès aux données pour les utilisateurs. En effet, les données sont présentées aux utilisateurs sous forme de relations entre domaines de valeurs, simplement représentées par des tables. Les recherches et mises à jour sont effectuées à l'aide d'un langage non procédural standardisé appelé SQL (Structured Query Language). Celui-ci permet d'exprimer des requêtes traduisant directement des phrases simples du langage naturel et de spécifier les données que l'on souhaite obtenir sans dire comment les accéder. C'est le SGBD qui doit déterminer le meilleur plan d'accès possible

## GENERALITES

pour évaluer une requête. Cette deuxième génération reprend, après les avoir faits évoluer et rendus plus souples, certains modèles d'accès de la première génération au niveau du SGBD interne, afin de mieux optimiser les accès. Les systèmes de deuxième génération sont commercialisés depuis 1980. Ils représentent aujourd'hui l'essentiel du marché des bases de données. Les principaux systèmes sont ORACLE, INGRES, SYBASE, INFORMIX, DB2 et SQL SERVER. Ils supportent en général une architecture répartie, au moins avec des stations clients transmettant leurs requêtes à de puissants serveurs gérant les bases. La troisième génération a été développée dans les laboratoires depuis le début des années 80. Elle commence à apparaître fortement dans l'industrie avec les extensions objet des systèmes relationnels. Elle supporte des modèles de données extensibles intégrant le relationnel et l'objet, ainsi que des architectures mieux réparties, permettant une meilleure collaboration entre des utilisateurs concurrents. Cette troisième génération est donc influencée par les modèles à objets, intégrant une structuration conjointe des programmes et des données en types, avec des possibilités de définir des sous-types par héritage. Cependant, elle conserve les acquis du relationnel en permettant une vision tabulaire des objets et une interrogation via le langage SQL étendu aux objets. Elle intègre aussi le support de règles actives plus ou moins dérivées de la logique (Cooper *et al.*, 2000). Ces règles permettent de mieux maintenir la cohérence des données en répercutant des mises à jour d'un objet sur d'autres objets dépendants. Les systèmes objet relationnels tels Oracle 8, DB2 Universal Database ou Informix Universal Server, ce dernier issu du système de recherche Illustra, sont les premiers représentants des systèmes de 3e génération. Les systèmes à objets tels ObjectStore ou O2 constituent une voie plus novatrice vers la troisième génération. Tous ces systèmes tentent de répondre aux besoins des nouvelles applications (multimédia, Web, CAO, bureautique, environnement, télécommunications, etc.). Quant à la quatrième génération, elle est déjà en marche et devrait mieux supporter Internet et le Web, les informations mal structurées, les objets multimédias, l'aide à la prise de décisions et l'extraction de connaissances à partir des données. On peut donc penser que les recherches actuelles, par exemple sur l'interrogation par le contenu des objets multimédias distribués et sur l'extraction de connaissances (data mining) conduiront à une évolution des SGBD de 3e génération plutôt qu'à une nouvelle révolution. Ce fut déjà le cas lors du passage de la 2e à la 3e génération, la révolution conduite par l'objet ayant en quelque sorte échoué : elle n'a pas réussi à renverser le relationnel, certes bousculé et adapté à l'objet. Finalement, l'évolution des SGBD peut être perçue comme celle d'un arbre, des branches nouvelles naissant mais se faisant généralement absorber par le tronc, qui grossit toujours d'avantage (George, 2003). Les tendances clefs du Big Data depuis 2022 ont entraîné des changements dans la manière dont les

organisations traitent, stockent et analysent les données. Voici les grandes tendances du domaine en 2022. Les capteurs IoT, le Edge computing, le Cloud public, le Multicloud, le Cloud hybride, les data lakes, les Dataviz, le Machine Learning, le Dataviz. La figure 7 récapitule ainsi, l'historique de l'évolution des BD depuis leurs créations jusqu'aujourd'hui.

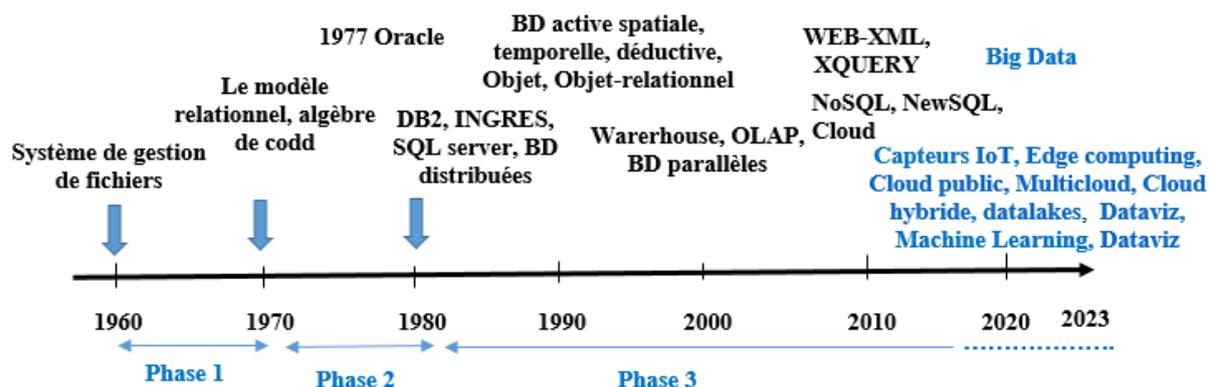


Figure 7 : Evolution des bases de données

### 2.1.4 Caractéristiques d'un SGBD

D'une manière générale, un SGBD doit avoir les caractéristiques suivantes :

- **Indépendance physique** : le niveau physique peut être modifié indépendamment du niveau conceptuel. Cela signifie que tous les aspects matériels de la base de données n'apparaissent pas pour l'utilisateur, il s'agit simplement d'une structure transparente de représentation des informations.
- **Indépendance logique** : le niveau conceptuel doit pouvoir être modifié sans remettre en cause le niveau physique, c'est-à-dire que l'administrateur de la base doit pouvoir la faire évoluer sans que cela gêne les utilisateurs.
- **Manipulabilité** : des personnes ne connaissant pas la base de données doivent être capables de décrire leurs requêtes sans faire référence à des éléments techniques de la base de données. Ceci peut se faire à travers un dictionnaire de données ou un catalogue système.
- **Rapidité des accès** : le système doit pouvoir fournir les réponses aux requêtes (Recherches d'informations à partir d'une ou plusieurs bases de données) le plus rapidement possible, cela implique des algorithmes de recherche rapides.
- **Différents langage d'accès** : le SGBD doit au moins supporter un langage adressant les concepts du modèle (par exemple, dans le cas du modèle relationnelle, ce langage est SQL).

## GENERALITES

- **Administration centralisée** : le SGBD doit permettre à l'administrateur de pouvoir manipuler les données, insérer des éléments, vérifier son intégrité de façon centralisée.
- **Limitation de la redondance** : le SGBD doit pouvoir éviter dans la mesure du possible des informations redondantes, afin d'éviter d'une part un gaspillage d'espace mémoire mais aussi des erreurs.
- **Vérification de l'intégrité** : les données doivent être cohérentes entre elles, de plus lorsque des éléments font références à d'autres, ces derniers doivent être présents.
- **Partage des données** : le SGBD doit permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder à la base de données de manière simultanée et transparente.
- **Sécurité des données** : le SGBD doit permettre de spécifier qui a le droit d'accéder ou de modifier tout ou une partie d'une base de données. Il faut donc présenter des mécanismes permettant de gérer les droits d'accès aux données selon les utilisateurs afin de se prémunir contre les manipulations illicites intentionnelles ou accidentelles.
- **Résistance aux pannes** : le SGBD doit garantir la cohérence de l'information et des traitements en cas de panne. Les opérations sur les bases de données pouvant être très longues, il faut fournir un mécanisme de reprise en cas de panne matérielle ou logicielle, intentionnelle ou fortuite
- **Capacité de stockage élevée** : le SGBD doit permettre de gérer des données très volumineuses, pouvant atteindre plusieurs milliards d'octets. Les unités de stockage sont passées du mégaoctet Mo ( $10^6$  octets) au gigaoctet Go ( $10^9$ ), puis au téraoctet To ( $10^{12}$ ), puis petaoctet Po ( $10^{16}$ ), voir même au exaoctet Eo ( $10^{18}$ ) et zettaoctet Zo ( $10^{21}$ ).

### 2.1.5 Différents types de SGBD et leur apport dans la gestion des eau souterraines

Le type d'un SGBD est caractérisé par le type du modèle de données qu'il implémente. Il existe ainsi cinq types de modèles de données (MacDonald, 1999) :

- **Le modèle hiérarchique** : les données sont stockées hiérarchiquement, selon une arborescence descendante. Ce modèle s'apparente à l'organisation des répertoires d'un ordinateur. Ce type de SGBD est particulièrement adapté à la modélisation de nomenclatures. Si le principe de relation « 1 vers N » n'est pas respecté, alors la hiérarchie doit être transformée en un réseau. Les structures de données hiérarchiques ont été très utilisées dans les premiers SGBD car très simple d'implémentation
- **Le modèle réseau** : ce modèle est une extension du modèle précédent. Il est alors possible d'établir des relations « 1 vers N » en définissant des associations entre tous les types d'enregistrements. Cependant, pour retrouver une donnée dans une telle

## GENERALITES

modélisation, il faut connaître le chemin d'accès, ce qui rend les programmes encore dépendants de la structure de données.

- **Le modèle déductif** : les données sont modélisées dans des tables, mais leur manipulation se fait par calcul de prédicats. C'est le modèle le moins courant.
- **Le modèle objet** : (SGBDOO, Système de Gestion de Bases de Données Orienté Objet) les données sont stockées sous forme d'objets, c'est-à-dire de structures appelées classes présentant des données membres qui les décrivent et représentent leur état. Les objets contiennent aussi la logique qui permet de les utiliser et de les modifier. Tous ces objets sont classés hiérarchiquement dans une base de données à objets.
- **Le modèle relationnel** : (SGBDR, Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles) : les données sont modélisées dans des tables ou relations. La manipulation de ces données se fait selon la théorie mathématique des relations. Il existe de nombreux Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles tels que ACCESS, Dbase, PostgreSQL, MySQL, DB2, ORACLE, SYBASE, SQL SERVEUR...

La base de données servira à accueillir de nombreux paramètres liés aux pour la gestion des ressources en eau souterraine.

Au Burkina Faso, Bôker (2003) a pu délimiter avec succès les zones potentielles en eau souterraine à partir du couplage Base de Donnée / SIG.

Au Gabon, pour contribuer à une meilleure gestion de la ressource hydrique à travers l'évaluation de la ressource en eau souterraine de la ville de Libreville centre, Leflem (2013) a conçu une base de données cartographique de cette ressource souterraine et réalisé des cartes thématiques. La conception de sa Base de Données (BD) a suivi le formalisme Langage Unifié de Modélisation (UML) découlant d'une étude préliminaire des besoins et à donner le Model Conceptuel des Données (MCD) ainsi que le Model Conceptuel Physique (MCP). Les différentes manipulations ont permis d'obtenir des cartes thématiques.

Dans les zones arides de la Tunisie, dans l'optique d'une meilleure gestion des sources hydriques, Hamed (2018) a eu recours à l'utilisation des systèmes d'informations géographiques. Ces derniers ont procuré une aide déterminante à travers les diverses possibilités des bases de données, de visualisation unique et d'analyse géographique propre aux cartes. Un système d'information géographique fut mis en place à partir de la compilation de diverses données (topographiques, géologiques, hydrogéologiques...). Le croisement entre les différentes couches d'information a permis l'édition des cartes thématiques, diagramme,

corrélations litho stratigraphiques. L'analyse de ces produits a permis une meilleure connaissance hydrodynamique du système aquifère profond ainsi qu'un suivi qualitatif et quantitatif des eaux souterraines.

A Tunis, Chandou (2019), a développé un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) baptisé « BDHYGABES » qui permet essentiellement de gérer dans un même référentiel des données relatives aux données géologiques, hydrodynamiques, climatiques et autres.

### **2.2 Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère de socle et l'approche géostatistique**

#### **2.2.1 Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère de socle**

La fonction d'un aquifère est d'emmagasiner les eaux souterraines, en régulant le stockage et la libération de l'eau (Margat, 1977). Les paramètres hydrodynamiques sont des indices qui définissent l'aptitude de l'aquifère à récupérer et à délivrer l'eau (Margat, 1977). Ils sont indispensables pour connaître l'aquifère et ses volumes d'eau exploitables par un puits (Raoult, 2001). Il s'agit de paramètres physiques définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir, à permettre son écoulement et à régir les propagations d'influence (Raoult, 2001).

Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement, la porosité efficace et le débit spécifique. Ces paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage.

##### **2.2.1.1 Transmissivité**

La transmissivité est définie comme étant la quantité d'eau qui peut être transmise horizontalement par l'épaisseur saturée totale de la roche à travers une unité de largeur sous l'effet du gradient hydraulique (Raoult, 2001). Elle permet de prévoir le niveau piézométrique suite à un pompage. Elle est déterminée par des essais de pompage. Vouillamoz (2003) mentionne que la transmissivité est une mesure de la productivité de l'aquifère.

##### **2.2.1.2 Perméabilité des aquifères**

La perméabilité définit l'aptitude du sol à permettre l'infiltration de l'eau (Gombert, 1997). C'est la propriété d'un aquifère qui est contrôlée par sa perméabilité ou conductivité hydraulique. Celle-ci est la capacité du milieu à laisser circuler l'eau généralement exprimée par le coefficient de perméabilité  $K$  de Darcy. Elle dépend des caractéristiques du milieu et du fluide. Elle a la dimension d'une vitesse. Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité et la perméabilité, mais pour être perméable la roche doit être obligatoirement poreuse (Castany,

1982). Les possibilités de circulation d'eau dans un aquifère dépendent de  $K$  et de son épaisseur mouillée ( $e$ ) en m.

### 2.2.1.3 Porosité

La plupart des roches et des sols contiennent naturellement un certain pourcentage de vides qui peuvent être occupés par l'eau ou par l'air : c'est la porosité (Lachassagne *et al.*, 2011). Il faut tout de suite distinguer l'existence de ces vides avec leur interconnexion permettant à un fluide d'y circuler. Elle se définit comme une condition nécessaire non suffisante de la perméabilité. Un cas particulier de vide dans les roches compactes est la fissuration. Par jeu tectonique, la quasi-totalité des roches de l'écorce terrestre est fracturée (failles, fissures, diaclases). Ces fissures s'organisent généralement en au moins deux directions principales de fissuration qui découpent la roche en blocs. On est donc en présence d'un réseau de fissures, plus ou moins interconnectées, qui peut créer des vides dans la roche si les fissures ne sont pas colmatées par un remplissage quelconque (argiles, calcite, quartz) ; On parle alors de porosité de fissure.

En hydrogéologie, seule sera prise en compte la porosité efficace qui représente l'eau libre, intéressante pour les sources, les puits et les forages. La porosité efficace représente une part de la porosité totale d'autant plus petite que les pores du milieu sont fins. C'est ainsi que les argiles ont une porosité totale qui peut être très grande, mais la finesse des interstices fait que toute l'eau est essentiellement de l'eau de rétention, et que la porosité efficace est faible. En règle générale, plus les grains d'une roche sont fins, plus la porosité efficace diminue et la capacité de rétention augmente.

### 2.2.1.4 Débit spécifique

Selon Castany (1982), le débit spécifique ( $Q_{sp}$ ) d'un forage est le débit pompé ( $Q$ ) rapporté au rabattement ( $s$ ) dans le forage dans des conditions d'essais de forage définies. Ce paramètre qui fait intervenir à la fois le rabattement et le débit de pompage (deux paramètres très intimement liés), donne des indications tant sur les caractéristiques des forages que sur l'état de connexion entre les réseaux de fractures (Douagui *et al.*, 2019). Cette grandeur est souvent utilisée pour évaluer l'efficacité des forages. Pour l'hydrogéologue, il est primordial de connaître l'épaisseur de la zone décomprimée, car l'expérience révèle que les débits spécifiques dans le socle diminuent très vite avec la profondeur (Sawadogo, 1984).

### 2.2.1.5 Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement est le volume d'eau libérée ou stockée par l'aquifère (Maréchal *et al.*, 2004).

## GENERALITES

Ces paramètres subiront d'une part, des traitements statistiques afin de prédire leurs évolutions dans l'espace et d'autres part, d'évaluer les potentialités en eaux souterraine par analyse multicritères.

### 2.2.2 Approche géostatistique

La géostatistique a été développée par Matheron (1970) initialement pour l'estimation des caractéristiques des gisements miniers et connaître la variance de ces estimations. Elle a été par la suite appliquée à d'autres domaines de recherches dont les Sciences de la Terre où se pose le problème de l'analyse des données spatiales. Elle est basée sur la théorie des variables régionalisées et son premier objectif est de mettre en évidence, lorsqu'elle existe, la structuration spatiale du phénomène étudié. On appelle variable régionalisée, un paramètre se déployant dans l'espace et/ou dans le temps avec une certaine structuration. En terme mathématique, la variable régionalisée est une fonction  $z(x)$  donnant la valeur au point  $x$  d'une caractéristique  $z$  du phénomène naturel étudié. Le comportement spatial trop complexe de ces fonctions ne permet pas aux expressions classiques de les décrire (Razack, 1984). Matheron (1970) suggère d'assimiler la mesure unique du paramètre étudié (processus de fracturation, transmissivité des aquifères, coefficient d'emmagasinement etc.) à une réalisation aléatoire par tirage au sort dans l'infinité de cas possibles, en fonction de sa loi de probabilité. La plupart des variables quantitatives utilisées en Sciences de la Terre peuvent être considérées comme des variables régionalisées (Massoud, 1988). Les lecteurs peuvent consulter pour plus de détails (Matheron, 1965 ; Razack, 1984 ; Massoud, 1988 ; Chauvet, 1994 et Lasm , 2000). L'application de la géostatistique à une variable donnée suppose la répétitivité de façon aléatoire de celle-ci. Les paramètres hydrodynamiques, phénomènes spatiaux peuvent être soumises à l'analyse géostatistique. Son outil mathématique est le variogramme. Il permet de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance augmente. L'usage du variogramme permet de préciser certaines caractéristiques qualitatives du milieu à savoir : la continuité, l'anisotropie, la taille de la régionalisation, la présence de structures imbriquées, etc.

En pratique, son usage revient à ajuster une fonction analytique (modèle) au variogramme expérimental.

#### 2.2.2.1 Les hypothèses d'application de la géostatistique

L'application de la géostatistique suppose qu'un certain nombre d'hypothèses doit être fait, en particulier l'hypothèse de stationnarité et l'hypothèse intrinsèque.

##### ✓ Stationnarité au sens large

## GENERALITES

Afin de rendre plus apte l'application aux phénomènes géologiques, des hypothèses ont été émises. La stationnarité au sens large permet d'imposer uniquement aux deux premiers moments (moyenne et covariance) de la loi de probabilité de la fonction aléatoire d'être invariant par translation (Lasm, 2000). Cela se traduit par les Equations 1 et Equation 2 :

$$E [Z (x)] = m (x) = m \quad (\text{Equation 1})$$

$$E [(Z (x) - m) - (Z (x') - m)] = K (x - x') = K (h) \quad (\text{Equation 2})$$

avec:

E: espérance mathématique;

m: moyenne;

K: covariance entre deux supports;

h: vecteur de module  $(x-x')$ .

L'équation (1) signifie que la moyenne est indépendante du point x, c'est à dire ne dépend pas de la position géographique et la seconde (2) signifie que la covariance ne dépend que de la distance séparant les deux points de mesure. De ces équations, il en résulte que la variance au point x ou l'autocovariance ( $K(0)$ ), doit être indépendante de la position du point x (Equation 3).

$$\text{VAR} [Z ((x))] = E [Z (x) - m]^2 = K (0) \quad (\text{Equation 3})$$

K (0): autocovariance ou variance a priori;

VAR [Z(x)]: variance au point x.

Le point faible de cette hypothèse, c'est qu'elle ne prend pas en compte la faculté de dispersion des phénomènes naturels. Nous nous tournons alors vers l'hypothèse intrinsèque.

### ✓ **Hypothèse intrinsèque**

Dans ce modèle les accroissements de fonction aléatoire sont stationnaires d'ordre 2. La fonction aléatoire est, par définition, la réalisation de la variable régionalisée. C'est une variable aléatoire à une infinité de composantes correspondant chacune à un point de l'espace. Cette fonction est définie à la fois dans un espace géographique et dans un espace probabilisé (Chauvet, 1994). Pour deux points quelconques, l'accroissement  $Z (x + h) - Z(x)$  admet des moments d'ordre 1 et 2, et ces moments sont stationnaires. L'étude géostatistique des phénomènes naturels tels que la fracturation peut être approchée par le biais de ces

## GENERALITES

accroissements. Ce modèle est caractérisé par une espérance nulle des accroissements et une variance indépendante du point  $x$ . Les Equations 4 et 5 peuvent être écrites :

$$E [Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (\text{Equation 4})$$

et

$$\text{VAR} [Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (\text{Equation 5})$$

Une fonction aléatoire qui satisfait à cette hypothèse est appelée fonction aléatoire intrinsèque d'ordre 2.

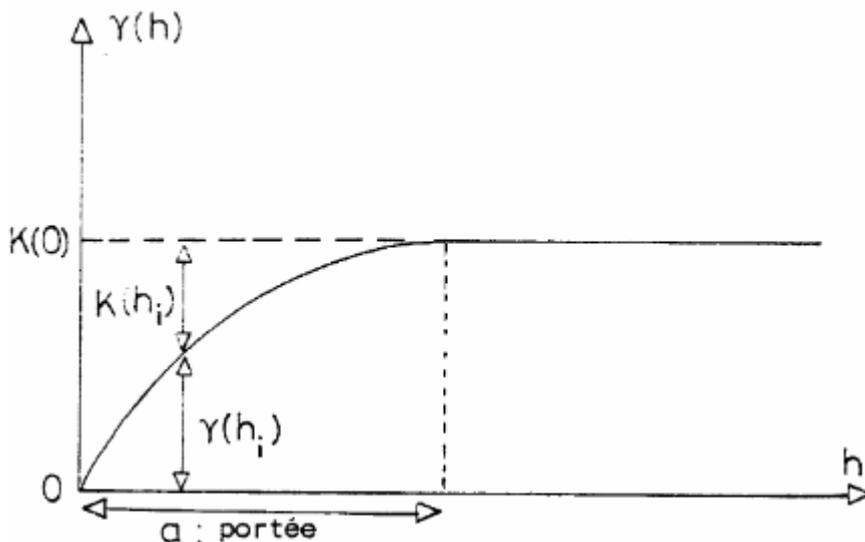
### 2.2.2.2 Variogramme

La fonction  $\gamma(h)$  s'appelle le « variogramme » ou « fonction intrinsèque » (Figure 8). Le variogramme est utilisé pour mener l'analyse structurale. Il est défini par les relations (Equation 6 et 7) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{VAR} [Z(x+h) - Z(x)] \quad (\text{Equation 6})$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad (\text{Equation 7})$$

Il exprime le demi-accroissement quadratique moyen entre deux points d'appui distants de  $h$ . La fonction variogramme est évaluée à partir des couples de points expérimentaux disponibles sur l'unique réalisation. La représentation de  $\gamma(h)$  versus  $h$  représente le graphique du variogramme. La figure 9 illustre les principales caractéristiques du variogramme.



**Figure 8 :** Les caractéristiques du variogramme.

NB : Initialement, c'est la fonction  $2\gamma(h)$  qui s'appelait « variogramme ». Actuellement, il est d'usage courant d'appeler « variogramme » la fonction  $\gamma(h)$ .

✓ **Propriétés du variogramme**

Les propriétés classiques du variogramme stationnaire sont :

- $\gamma(0)$  : le graphe passe par l'origine ;
- $\gamma(h) \quad 0h \geq \gamma$  est une fonction positive et croissante ;
- $\gamma(h) = \gamma(-h)$  est une fonction symétrique, c'est à dire une fonction paire ;
- $\gamma(\infty) = K(0)$  est une fonction bornée.

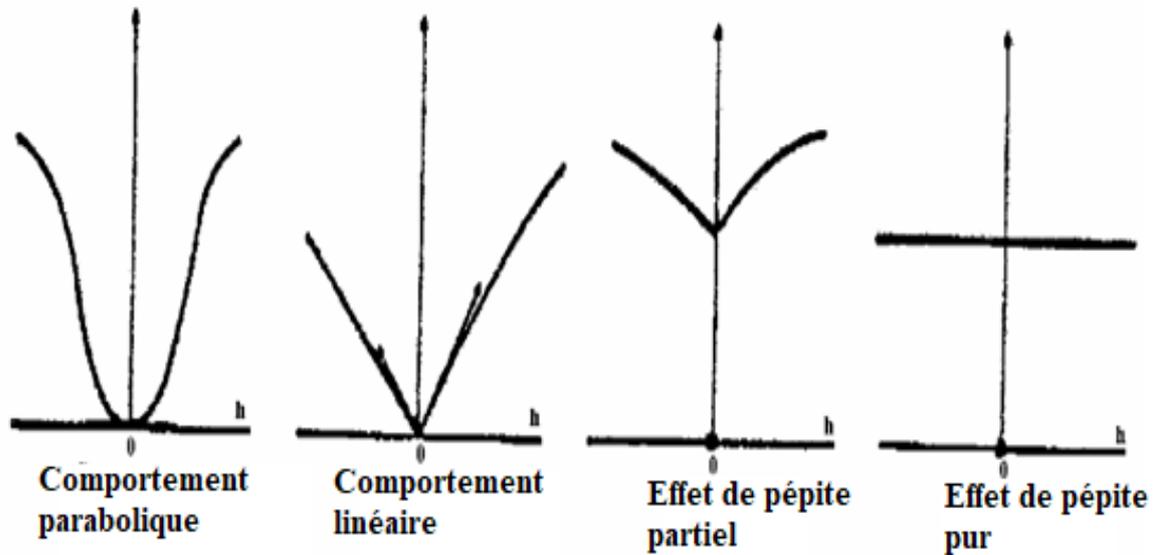
✓ **Comportement du graphe**

On étudie généralement le comportement du variogramme aux faibles distances, c'est-à-dire au voisinage de l'origine, et à l'infini. Le variogramme peut être soit borné avec un palier ou au contraire être croissant avec une variance infinie. L'examen du comportement du variogramme est donc important car il caractérise la structure du phénomène étudié.

✓ **Comportement du variogramme à l'origine**

Le comportement du variogramme à l'origine traduit le degré de continuité et de régularité spatiale de la variable régionalisée. On distingue quatre types de comportements classiques (figure 9) :

- allure parabolique (tangente nulle à l'origine), elle caractérise une variable à structuration très régulière, continue et dérivable ;
- allure linéaire (tangente oblique à l'origine), elle est moins régulière que la première, continue mais non dérivable ;
- discontinuité à l'origine, connue sous le nom d'effet de pépite, la variable est très irrégulière (non continue). Dans ce cas, le variogramme ne passe pas par l'origine ;
- comportement plat ou effet de pépite pure, la variable n'est pas structurée. Deux points distants d'une valeur  $h$  même très faible sont indépendants, c'est à dire qu'ils sont sans corrélation quelle que soit la valeur de  $h$  non nulle.



**Figure 9** : Comportement à l'origine du variogramme

#### ✓ Effet de pépité

La continuité spatiale de la fonction est conditionnée par le comportement du variogramme à l'origine. En principe, quand  $h$  approche zéro,  $\gamma(h)$  devrait être proche de zéro. Cependant, presque tous les variogrammes expérimentaux montrent une discontinuité à l'origine qui est appelée effet de pépité. C'est la réminiscence de structures inaccessibles à l'échelle abordée. Plusieurs phénomènes naturels présentent des structurations à diverses échelles. Toutefois, les erreurs de mesures peuvent se traduire aussi par un effet de pépité qui s'additionne aux précédents. Il est difficile sur un variogramme expérimental de séparer l'effet de pépité en microstructure de l'erreur de mesure (Massoud, 1988 ; Lasm, 2000). L'effet de pépité est donc dû à deux causes principales :

- erreurs de mesures, c'est à dire une pauvre qualité des données ;
- existence de structures à une échelle beaucoup plus petite que celle explorée.

#### ✓ Comportement du variogramme à l'infini

Quand la distance  $h$  prend des valeurs de plus en plus grandes, le variogramme peut atteindre un palier et se stabiliser, il peut alors être borné ou au contraire croître à l'infini lorsqu'il n'est pas borné. La distance à partir de laquelle le palier (plateau) est atteint est appelée la portée et notée le plus souvent «  $a$  ». Elle caractérise la zone d'influence du phénomène étudié. Au-delà de cette distance, il y a indépendance entre deux supports du paramètre, on dit aussi que le variogramme n'est pas structuré ou qu'il y a absence de corrélation. La valeur du palier est égale à la variance des données.

### ✓ **Isotropie et anisotropie spatiale**

Dans la définition du variogramme,  $h$  est en fait un vecteur défini par sa direction et sa longueur. Si  $\gamma(h)$  dépend seulement de la distance, la corrélation entre les données est la même pour toute direction de  $h$ , le phénomène est dit isotrope. Par contre si le variogramme, suivant les différentes directions, présente des allures particulières alors le phénomène étudié est anisotrope. On distingue les anisotropies géométrique et zonale. L'anisotropie géométrique se caractérise par la variation de la distance de régionalisation selon les directions de calculs du variogramme pour un même champ du phénomène étudié. L'anisotropie zonale correspond aux variations de la variance a priori dans les mêmes conditions.

### ✓ **Ajustement aux modèles théoriques**

A partir de l'estimation du variogramme, deux objectifs sont en général assignés :

- ajuster un modèle au variogramme expérimental ;
- déterminer les caractéristiques de la structure spatiale.

L'interprétation rigoureuse des variogrammes repose sur l'ajustement de ceux-ci aux modèles théoriques existants (sphérique, gaussien, exponentiel, puissance, linéaire, etc.). Pour les variogrammes bornés à comportement linéaire à l'origine avec ou sans effet de pépité, les ajustements suivant les modèles exponentiels et sphériques sont préconisés (Razack, 1984). Ces modèles doivent tenir compte des caractéristiques du variogramme expérimental à savoir :

- ✓ le comportement à l'origine et au voisinage de l'origine ;
- ✓ l'existence éventuelle d'un effet de pépité ;
- ✓ l'existence éventuelle d'un palier.

### **2.3 Analyse multicritère**

L'analyse multicritère est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Elle a été développée dans la deuxième moitié du XXème siècle afin d'apporter des éléments rationnels pour des problèmes décisionnels (Meave *et al.*, 2012). En effet, la rationalité de la décision est difficilement perçue lorsque certains problèmes nécessitent de prendre en compte un grand nombre de critères pour décrire l'objet de décision. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un bon choix. Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir. Pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit

créer ce choix (Renault, 2003). En effet, une situation qui implique de nombreux critères peut être source de confusion en l'absence d'un processus de décision logique et bien structuré. Ainsi, l'objectif des méthodes d'analyses multicritères est d'aider à prendre une décision acceptable et réaliste, dans des situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite, et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de considérer tous les critères entrant en compte, leur attribuer un poids lié à leur importance relative, de noter chaque action par rapport à tous les critères, et finalement d'agréger ces résultats (Renault, 2003). L'Analyse Multicritères (AMC) utilisée conjointement avec le SIG a déjà fait l'objet de plusieurs applications, surtout pour la priorisation des interventions en matière d'approvisionnement en eau souterraine au Sénégal (Ba *et al.*, 2010) ; UNICEF (2010d) au Mali et en Côte d'Ivoire (Jourda, 2005 ; Mangoua *et al.*, 2010 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015).

### **2.4 Apport des SIG dans la prospection de l'eau souterraine**

#### **❖ Histoire du SIG (Système d'Information Géographique)**

Un SIG est un système d'information informatique traitant d'objets localisés dans l'espace. Il a pour but d'informer sur la géographie d'un territoire donné. Il s'appuie sur un certain nombre de données géographiques et alphanumériques. Ces données sont structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision. Il a pour objectif de permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale afin de faciliter la gestion et l'aménagement des territoires. Un SIG contient plusieurs sortes d'objets géographiques qui sont organisés par thématiques, affichés sous forme de couches. A chaque objet peut être associé une fiche contenant les informations alphanumériques permettant de décrire l'objet.

La première application SIG, souvent citée en épidémiologie, est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow. Il s'agit de l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il parvint à déterminer que c'était l'eau d'un certain puit qui était le foyer de contamination. Dans les années 1960, les cartes de l'Afrique de l'Est, trop nombreuses pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières, font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques (SIG). L'avancée de l'informatique encouragée par la prise de conscience environnementale ont permis l'usage des techniques et méthodes dans la science et l'aménagement du territoire. Le suivi, la gestion et la protection de la biodiversité sont également à l'origine de l'évolution des applications SIG.

## GENERALITES

Depuis 1970, de nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires et collaboratives ont vu le jour.

On distingue trois périodes principales dans l'évolution des SIG :

- Fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques ;
- Milieu des années 1970 - début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique/SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques ...);
- Depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels SIG, développements des applications SIG, mise en réseau (bases de données distribuées, avec depuis les années 1990, des applications SIG sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition de « logiciels libres » ou d'outils dédiés aux pratiques coopératives ...

Le système d'information géographique combiné à la cartographie permet de réaliser des documents cartographiques, bien qu'il apparaisse comme un outil incontournable permettant d'organiser les couches d'informations et de les analyser dans le but d'en extraire les données. L'utilisation d'un SIG pour la gestion des ressources concerne essentiellement la cartographie du terrain à étudier (les différentes cartes réalisées). La complexité et la diversité des données relatives à l'environnement ont favorisé le développement de systèmes capables de répondre aux besoins de collecte, d'analyse et de représentation de phénomènes environnementaux. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et le suivi des phénomènes dynamiques et, une nécessité pour l'orientation d'investissement et disposer d'arguments valables pour la prise de décisions (Missoumi & Tadjerouni, 2003).

Plusieurs travaux (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Youan Ta *et al.*, 2008 ; Dibi, 2008 ; Baka *et al.*, 2012) en Côte d'Ivoire ont montré l'apport des SIG dans l'identification des ressources en eau. Biémi (1992) a mis en évidence les linéaments structuraux de la région de la Marahoué par télédétection ; Savané (1997) a utilisé la télédétection pour cartographier les fractures de la région du Denguélé ; Kouamé (1999) a étudié l'hydrogéologie de la région de Man par traitement d'image ; les outils de la télédétection ont permis à Youan Ta (2008) de proposer une esquisse litho structurale actualisée et d'étudier les potentialités en eau souterraine

## GENERALITES

de la région de Bondoukou ; Dibi a utilisé les SIG pour cartographier les sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso.

Les méthodes de traitement des images satellitaires sont les mêmes d'un auteur à un autre. Il s'agit des techniques de l'analyse en composante principale (ACP), les combinaisons d'images, les compositions colorées et les filtrages spatio-directionnels des images. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) consiste à développer le signal-image sur la base de fonctions orthogonales entre elles (Youan Ta *et al.*, 2008 ; N'go *et al.*, 2010). C'est une technique de rehaussement qui s'emploie à rechercher dans l'espace des radiométries d'une image, les axes de plus grandes variances. Le résultat prend la forme de plusieurs nouveaux canaux présentant un intérêt explicatif décroissant. La technique de la combinaison de bandes est basée sur des opérations mathématiques plus ou moins simples (rapports, sommes, différences, multiplications) visant soit à réduire la somme d'informations ou la mise en évidence de thèmes particuliers (végétations, sols). En effet, la nature numérique des données de télédétection se prête particulièrement bien à des opérations arithmétiques entre canaux (Youan Ta *et al.*, 2008). Les filtres directionnels sont conçus de façon à faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture (Himyari *et al.*, 2002). Cette dernière fait référence à la fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image. En sciences de la terre, ces filtres directionnels sont utilisés pour la détection de fractures ayant de grandes fréquences spatiales (Bonn & Rochon, 1992). Ces méthodes ont donné de très bons résultats lors de l'étude structurale du bassin versant de la Marahoué avec Biémi (1992), des chaînes des Toura avec Kouamé (1999), de la région de Korhogo avec Jourda (2005) et du département de Bondoukou avec Youan Ta (2008). Les principaux résultats obtenus par ces auteurs sont :

- la cartographie des grandes formations géologiques du socle précambrien des différentes régions de la Côte d'Ivoire, l'identification de nombreux couloirs et accidents régionaux et l'obtention de la carte détaillée de fractures ;
- les différents axes potentiels de circulation des eaux souterraines et des zones de concentration ont été définis par le calcul des perméabilités induites par les fractures ;
- l'intégration de toutes ces informations à l'intérieur d'un SIG a permis d'établir la carte hydrogéologique et la carte des sites favorables à l'implantation des forages à gros débits.

En Côte d'Ivoire, la conception du SIG dans le domaine de la recherche de l'eau souterraine a été initiée par Biémi (1992). Par la suite, elle a connu plusieurs applications (Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2011 et Doumouya *et al.*, 2012).

Cependant, le choix des méthodes d'agrégation varie d'un auteur à un autre. Ainsi, Savané (1997) et Saley (2003) ont adopté la méthode de pondération, alors que Jourda (2005) a opté pour la codification et l'analyse multicritère.

### **2.5 Synthèse sur l'état du service d'hydraulique rurale et la notion d'analyse spatiale**

La problématique de l'eau potable figure au cœur des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), à savoir réduire de moitié, d'ici 2030, le pourcentage de la population qui n'a pas accès de façon durable à un approvisionnement en eau potable dans le monde (WWAP, 2019). Dans l'optique d'honorer cet engagement, les Etats multiplient les actions en optimisant la desserte en eau potable tant en milieu urbain que rural. Pour cela, un état des lieux et une maîtrise de la croissance démographique doit être pris en compte dans tout le processus de planification, de prévision et de réalisation des infrastructures d'approvisionnement en eau potable. Cette approche fut exécuté dans d'autres pays et en Côte d'Ivoire. A cet effet, les travaux suivants peuvent être cités en exemples, Eau Vive (2012) au Burkina Faso, Hounguevou *et al.*, (2014) au Bénin, en Côte d'Ivoire (Loba *et al.*, 2013 ; Kougbo, 2015 ; Yao *et al.*, 2016 ; Touré *et al.*, 2019 ; Karidioula *et al.*, 2019).

L'analyse spatiale est une approche géographique qui traite de notre compréhension du monde en cartographiant des objets et les liens entre eux. Elle se base sur un espace organisé qui est bien plus qu'un simple support. L'analyse spatiale permet de comprendre les relations qui existent entre les données. Chaque espace possède ses caractéristiques propres et amène à adapter la manière de les étudier avec des outils adaptés. Selon les problématiques il existe des outils techniques tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG), mais aussi certaines disciplines empruntées aux sciences sociales comme la sociologie, la géographie ou encore l'économie. C'est cette transversalité qui permettra d'avoir la vision la plus fine possible d'un territoire et des dynamiques qui le composent. Le principal objectif de l'analyse spatiale est de montrer en quoi ces caractéristiques peuvent influencer sur la façon dont les groupes sociaux et les activités y sont organisés. En pratique, comment se passe, au sein de l'Observatoire, la mise en place de cette démarche ?

### **Conclusion partielle**

Jusque dans les années 1960, l'organisation classique des données dans une entreprise se faisait sous forme de fichiers. Très vite, des limites sont apparues (Processus long et fastidieux, Contrôle en différé des données impliquant une augmentation des délais et des risques d'erreurs). Dès 1965 apparaît l'idée de distinguer les données de leurs traitements. Vers la fin des années 1960, on commence à voir l'apparition des premiers Système de gestion de base de données (les systèmes réseaux et hiérarchiques). Ce n'est qu'à partir de 1970 qu'apparaît la deuxième génération de SGBD : les systèmes relationnels. Au début des années 1980, la troisième génération de SGBD (les systèmes orientés objet). La quatrième génération est en marche et devrait mieux supporter Internet et le Web.

La fonction d'un aquifère est d'emmagasiner les eaux souterraines, en régulant le stockage et la libération de l'eau. Les paramètres hydrodynamiques sont des indices qui définissent l'aptitude de l'aquifère à récupérer et à délivrer l'eau. Ils sont indispensables pour connaître l'aquifère et ses volumes d'eau exploitables par un puits. Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et la porosité efficace. Certains paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage. Ils peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain, notamment lors des essais de pompages.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et le suivi des phénomènes. Depuis 1970 cet outil joue un rôle important dans la gestion des ressources. En Côte d'Ivoire, la conception du SIG dans le domaine de la recherche de l'eau souterraine a connu plusieurs applications. Cependant, le choix des méthodes d'agrégation (pondération, codification et analyse multicritère) varie d'un auteur à un autre.

La partie suivante est consacrée à la présentation détaillée des étapes de modélisations de la base de données et les options d'exploitation de celle-ci.

## **PARTIE II : MATERIEL ET METHODES**

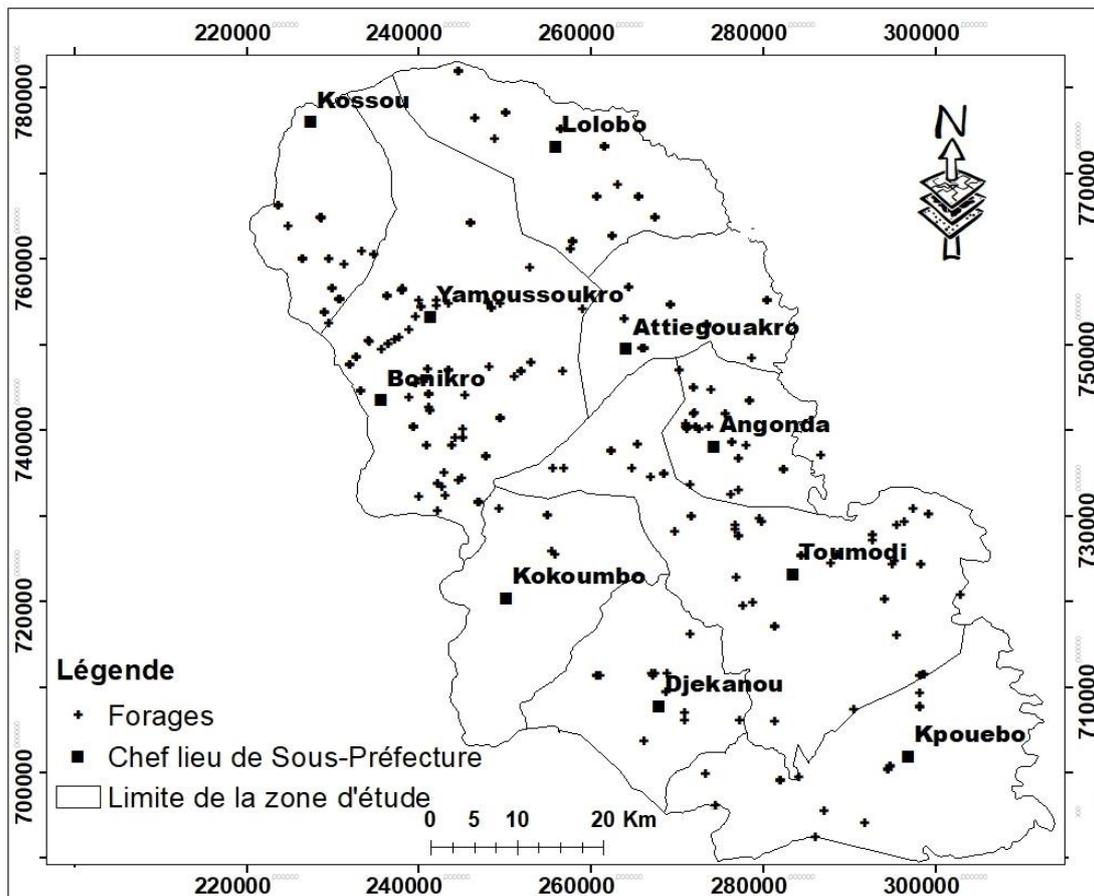
**CHAPITRE 3 : Données et matériel**

Le présent chapitre rend compte des données et des outils utilisés. Ces données sont constituées de données historiques acquises auprès des structures en charge de l’hydraulique et de données récentes collectées au cours des campagnes de terrain.

**3.1 Données**

**3.1.1 Données hydrogéologiques**

Ces données sont constituées de fiches techniques de forages sur la zone d’étude. La Figure 10 présente la répartition des forages. Elles ont été collectées auprès de l’antenne de la Direction Régionale de l’Hydraulique (DRH) de Yamoussoukro. Il s’agit de 100 fiches techniques de forages avec des renseignements complètes contenant les paramètres hydrauliques (le débit de forage, l’épaisseur d’altération, la profondeur totale, le niveau statique, l’épaisseur de socle, les profondeurs d’arrivée d’eau, et la nature des formations géologiques sous-jacentes) et 60 fiches d’essais de pompage qui ont permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d’emménagement). Par la suite, 161 autres fiches techniques de forages qui n’avaient pas toutes les informations ont été compilées et ajoutées.



**Figure 10 : Répartition des forages sélectionnés sur la zone d’étude**

### 3.1.2 Données démographiques

Les données statistiques portant sur le recensement sur la population de Yamoussoukro et de Toumodi obtenues à l'INS pour les années 2014 et 2021 ont permis d'estimer les besoins futurs en forages.

### 3.1.3 Données cartographiques

Une carte géologique des départements de Yamoussoukro et Toumodi extraite de celle de la Côte d'Ivoire, a permis de connaître les différentes formations géologiques et les types de roches de la zone d'étude. Il s'agit de la carte géologique établie au 1/2 000 000 pour le territoire ivoirien (Tagnini, 1971) éditée par la Société pour le développement minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI) en 1972.

Un extrait topographique de ces départements a également été obtenu au ministère du plan de Yamoussoukro. Cette carte fournit une connaissance métrique des limites des départements et des sous - préfectures à une échelle de 1/200 000 et des informations complémentaires telles que le réseau routier et le réseau hydrographique.

### 3.1.4 Données satellitaires

Il s'agit d'une image ASTER faisant référence à des fichiers matriciels et vectoriels pour le modèle numérique de terrain (MNT) de la Côte d'Ivoire. Dans le cadre de l'étude, un MNT de résolution 30 m x 30 m issu de la campagne SRTM (Shuttle Radar Topography and Mapping) du 11 février 2015 a été utilisé. Les données ont été acquises gratuitement via le site : <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Cette image a été utilisée pour extraire le réseau hydrographique et la pente.

## 3.2 Outils

L'essentiel des outils utilisés est de deux types. Il s'agit d'outils de terrain et d'outils de traitement des données.

### 3.2.1 Matériel de collecte de données hydrodynamiques

Pour la collecte des données, plusieurs outils ont été utilisés (Figure 11). Un GPS portatif de marques GARMIN a permis de prendre les coordonnées géographiques des points d'échantillonnage, un infiltromètre à double anneau a permis de mesurer la perméabilité *in situ* des altérites, une sonde piézométrique pour la détermination du niveau d'eau dans les forages et un appareil photo numérique qui nous a permis de faire des prises de vue sur le terrain.



**Figure 11** : Matériel de mesure de terrain

a- GPS; b- Sonde piézométrique ; c- Infiltromètre double anneau ; d- Appareil photo numérique.

### 3.2.2 Matériel de traitement de données

L'essentiel de ce travail a été exécuté à partir d'outils informatiques et de logiciels dont dispose le Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé.

Les opérations de modélisations conceptuelles et logiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Sybase Power AMC 9.5. La base de données, elle a été gérée par le logiciel Microsoft Access 2010 qui est un SGBD de type relationnel. Il permet de stocker, gérer et utiliser les données. Il garantit leurs qualités ainsi que leur cohérence et autorise l'accès aux données à plusieurs utilisateurs simultanément. Le logiciel choisi pour réaliser le prototype du Système d'Information Géographique à Référence Spatiale et pour la production de support cartographique est ArcGIS 10.4. Le logiciel Stastica 7.5 a été utilisé pour les traitements statistiques. La détermination de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des couches fissurées a été faite à l'aide du logiciel AQTESOLV.

### **Conclusion partielle**

Cette partie du travail a consisté à la présentation de l'ensemble des données brutes et des outils utilisés dans cette étude. Les outils informatiques et les logiciels utilisés ont permis de transformer les différentes données recueillies en de nombreuses informations utiles pour atteindre les objectifs de cette étude. En effet, ces données sont regroupées en deux types à savoir :

- ✓ les données exogènes constituées de données brutes qui ont été nécessaires pour la réalisation de ce travail. Il s'agit, des fiches techniques de forages, d'essais de pompages, de données piézométriques ;
- ✓ les données cartographiques et images qui se résument essentiellement à une carte géologique établie à l'échelle 1/2000000 du territoire ivoirien et une image SRTM utilisée pour apprécier l'altimétrie de la zone d'étude et élaborer les différentes cartes thématiques.

### **CHAPITRE 4 : Méthodes**

La méthodologie adoptée dans ce travail s'articule autour de quatre axes. Il s'agit d'abord de la conception de la base de données hydrogéologiques pour le stockage, la description et la compréhension du système hydrogéologique (i), ensuite d'analyser les paramètres susceptibles d'influencer la productivité des forages (ii), puis de cartographier les zones potentiellement favorables à l'implantation de forages économiques (iii). Enfin, de faire un état des lieux de l'approvisionnement en eau potable de la zone d'étude afin d'y optimiser la desserte en eau potable (iv).

#### **4.1 Conception de la base de données à référence spatiale des forages**

L'élaboration de la base de données se traduit par un grand nombre de contraintes ayant orientées les choix de réalisation en plusieurs étapes à savoir : la structuration de la base de données sous Access et sous ArcCatalog, le développement et enfin les requêtes qui conduiront à des analyses géospatiales.

##### **4.1.1 Choix de la méthode Merise**

La méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude est basée sur la **Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise ou MERISE**. C'est une méthode qui permet d'analyser un système d'information et de détailler l'ensemble des données et des règles qui le composent afin de comprendre son fonctionnement et de faciliter la mise en place d'un traitement informatique. La méthode d'analyse MERISE a été créée au début des années 80, par la volonté des autorités publiques Françaises (le ministère de l'industrie) désireuses de doter les administrations et les entreprises publiques d'une méthodologie rigoureuse (Konan-Waidhet, 2007).

Une fois les données acquises, il faut les organiser afin que le Système d'Information à Référence spatiale (SIRS) dans lequel elles seront intégrées puisse les exploiter rationnellement et effectuer les traitements nécessaires. Cela passe par la modélisation des données. La modélisation constitue un préalable essentiel dans l'optique du développement ou de l'étude d'applications informatiques. Cette modélisation est aussi utilisée avec les bases de données géographiques qui sont elles aussi organisées et structurées. Il existe plusieurs méthodes d'analyse et de modélisation des systèmes d'information (MERISE, Information Engineering, Méga, SSADM, etc.). La plus utilisée à l'heure actuelle étant sans doute MERISE. Elle propose un cadre qui permet d'analyser les données et d'optimiser la création du modèle. C'est elle que nous avons utilisée, du fait de son universalité et parce qu'elle est bien adaptée au formalisme Entité-Relation. Par ailleurs, le logiciel de modélisation Sybase Power AMC est également

adapté à ce formalisme. Le choix de cette methode impose de découper le travail en différentes étapes.

### 4.1.2 Etapes de la conception

Les étapes de la conception de la base de données sont les suivantes :

#### ❖ **Modélisation de données**

- Dictionnaire des Données (DD)
- Modèle Conceptuel des Données (MCD)
- Modèle Logique des Données (MLD)

#### ❖ **Réalisation d'un prototype**

- Modèle Physique des Données (MPD)
- Réalisation de requêtes

### 4.1.3 Modélisation des données

La conception d'une base de données passe obligatoirement par un processus de modélisation qui est une représentation de la réalité élaborée en fonction d'un objectif précis et selon un formalisme approprié. Ainsi, la modélisation constitue la base du système d'information. Il s'agit de structurer la base de données de manière à permettre d'accéder rapidement et aisément aux différentes informations qui s'y trouvent. Cette étape nécessite la mise en place d'un modèle conceptuel des données indispensables, qui sera ensuite traduit en un modèle relationnel logique qui pourra finalement être implanté dans le logiciel SIRS désiré. Chaque modèle constitue une étape dans la réflexion aboutissant à l'outil final.

#### 4.1.3.1 Modélisation Conceptuelle des Données (MCD)

– Les objectifs principaux du MCD sont les suivantes :  
représenter synthétiquement et simplement le résultat de la recherche effectuée (les données) ;

– modéliser le résultat du travail de recherche de façon indépendante d'un logiciel quelconque. Cela permettra de choisir de manière optimale les différents supports informatiques à utiliser pour l'implantation du SIRS et de les changer au cours du temps si nécessaire.

Le modèle conceptuel est la première phase de réflexion dans la conception du SIRS. La complexité de la réalité ne permet pas de la décrire simplement. Un processus d'abstraction devient obligatoire dès le moment où l'on passe à une modélisation et seuls les éléments

prépondérants sont retenus et regroupés en différentes catégories dans le modèle. La prépondérance des éléments est une notion souvent subjective et arbitraire, c'est la raison pour laquelle il existe une grande quantité de modèle pour une même problématique. En effet, ce modèle n'est qu'une approche possible de la réalité parmi tant d'autres. La conception de notre modèle se veut pluridisciplinaire.

### ✓ **Formalisme Entité-Relation**

Le formalisme Entité-Relation ou Entité-Association a été utilisé pour construire le modèle conceptuel. Il sert à effectuer une description synthétique des phénomènes et des liens structurels entre eux en utilisant un langage graphique simple. Il s'agit d'un formalisme qui peut être adapté aux applications à référence spatiale et s'articule autour des principaux concepts suivants :

- **Entité** : objet du monde réel ayant une existence propre et à propos duquel on veut enregistrer des informations. Les entités sont représentées par un rectangle dans lequel est inscrit le nom de la donnée qu'elles représentent en lettres majuscules. Les entités sont regroupées en trois classes fondamentales :

- ❖ les entités sans dimension spatiale ;
- ❖ les entités à référence spatiale ;
- ❖ les objets cartographiques nécessaires pour localiser les deux premiers types d'entités.

- **Association (ou Relation)** : il s'agit du lien entre deux entités qui jouent des rôles bien déterminés. Les associations sont représentées par des figures ovales contenant leur nom. Elles sont souvent décrites par un verbe et peuvent contenir des attributs.

- **Attribut** : caractéristique d'une entité ou d'une association. L'ensemble des attributs représente l'ensemble des informations que l'on souhaite conserver sur les entités et les associations. Les attributs possèdent un nom unique et sont inscrits dans l'entité ou dans l'association en lettres minuscules. Chaque entité possède une clé unique (identifiant) qui est l'attribut apparaissant en souligné dans les rectangles.

- **Cardinalité** : exprime le nombre de fois où une entité est concernée par une association. On distingue les cardinalités maximum et minimum. La cardinalité indique le type de relation désiré de "un à plusieurs", de "plusieurs à plusieurs", etc. Ces cardinalités sont inscrites sur les polygones qui relient les relations aux entités.

La mise en œuvre de chacun de ces concepts constitue une étape dans la conception du MCD.

### ✓ **Règles générales du formalisme Entité-Relation**

## MATERIEL ET METHODES

Il est nécessaire de présenter les règles qui nous ont guidées dans cette tâche afin de permettre une meilleure compréhension de la conception du MCD :

- Ne pas utiliser plus d'une fois un même nom d'entité, d'attribut ou de relation ;
- Ne pas incorporer d'attributs qui peuvent apparaître un nombre inconnu de fois dans une entité, mais plutôt en faire une entité séparée ;
- Utiliser un identifiant fort le plus souvent possible, car il doit permettre de reconnaître une entité parmi toutes les autres ; de plus, il ne doit pas contenir de l'information ;
- S'assurer que le modèle correspond bien à la perception qu'ont les usagers de la réalité et à leur vocabulaire. Il faut faire abstraction de sa propre compréhension et bien définir ce que l'utilisateur attend ;
- Mettre uniquement des attributs de base, c'est-à-dire, des attributs non dérivés à partir d'autres attributs afin d'éviter des redondances ;
- Etre toujours cohérent entre les noms utilisés, les définitions choisies et les cardinalités. Il faut vérifier les changements et leurs répercussions.

Le formalisme Entité-Relation s'articule donc autour de cinq (5) concepts principaux qui déterminent successivement les étapes de la mise en œuvre du modèle conceptuel : Entité, Attribut, Identifiant, Association et Cardinalité.

### ✓ **Identification des classes d'entités**

Elle consiste à choisir les objets ayant une existence propre et à propos desquels nous voulons enregistrer des informations. L'identification des entités facilitera la poursuite du travail.

#### ▪ **DEPARTEMENT**

Le département représente la circonscription la plus grande de la zone d'étude. Il inclut les sous-préfectures, villages et campements.

#### ▪ **SOUS-PREFECTURE**

Cette entité est rattachée au département. Il est caractérisé par un ensemble de villages et de campements.

#### ▪ **VILLAGE ET CAMPEMENTS**

Il est à la fois rattaché à la sous-préfecture et au département. Il est le lieu de l'implantation du forage qui est l'entité centrale de cette étude.

#### ▪ **HYDROGRAPHIE**

La carte du réseau hydrographique est intégrée dans le SIRS.

#### ▪ **RESEAU ROUTIER**

Les voies de communication sont intégrées dans le prototype.

## MATERIEL ET METHODES

### ▪ **CARTE GEOLOGIQUE**

La carte géologique est intégrée dans le SIRS. Elle constitue une source d'information cartographique qui donne plus de précision sur la géologie de l'aquifère.

### ▪ **FORAGE**

Le paramètre le plus important est la coordonnée géographique du forage. Sa position sur la surface du globe. Cette coordonnée permet la liaison avec le domaine spatial.

### ▪ **LITHOLOGIE**

Cette entité est rattachée à l'entité forage. Elle permet d'apprécier les roches dans lesquelles se trouvent ses réserves d'eau.

### ▪ **PARAMÈTRE HYDRODYNAMIQUE**

Cette entité est aussi reliée à l'entité forage. La description des paramètres hydrodynamiques permettra de caractériser les aquifères de la région.

### ▪ **PARAMETRE CHIMIQUE**

Cette entité est rattachée à l'entité forage et permet d'apprécier la qualité chimique des eaux Souterraines dans la zone d'étude.

### ▪ **COMITE DE GESTION**

Cette entité est également rattachée à l'entité forage. Un comité de gestion du forage s'avère nécessaire car le mauvais état de certaines pompes pousse les populations à consommer des eaux de mauvaise qualité (source naturelle, puits traditionnels et marigots) dans de nombreuses localités.

### ▪ **ESSAIS DE POMPAGE**

Ce sont des données indirectes reliées au forage. Elles sont issues d'interprétation après une manipulation géophysique ou mécanique sur le forage. En fonction du temps le niveau se stabilise ou varie. L'interprétation de ces différences permet de déduire les paramètres hydrauliques.

### ▪ **GEOPHYSIQUE**

Cet aspect est rattaché au module village. Lors de diagraphie (log géophysique), les courbes obtenues sont interprétées pour ressortir des informations sur les unités géologiques, sur la fracturation et l'état minéralogique, géochimique et pétro physique des structures aquifères. Ces données interprétées sont notamment utilisées pour élaborer des colonnes lithologiques synthétiques.

### ▪ **PIEZOMETRIE**

Ce module est rattaché au forage. Elle donne la valeur du niveau de l'eau dans le forage.

### ▪ **EQUIPEMENT DU FORAGE**

L'équipement du forage consiste à disposer les crépines, les tubages, les normes, etc. Il est très important après plusieurs années, lors de la réhabilitation du forage de connaître la manière dont le forage a été construit et avec quels matériaux.

#### ✓ **Identification des attributs pour chaque classe**

L'inventaire des attributs est l'étape qui vient après l'identification des entités. Seules, les propriétés nécessaires au développement du modèle seront retenues. Ainsi, les propriétés retenues pour chaque entité se présentent comme suit :

Un **DEPARTEMENT** est caractérisé par sa localisation, son nom, le nombre de forage qu'il possède, le nombre de forage fonctionnels et non fonctionnels, sa superficie, le nombre d'habitant.

Une **SOUS-PREFECTURE** est caractérisé par sa localisation, son nom, le nombre de forage qu'il possède, le nombre de forage fonctionnels et non fonctionnels, sa superficie, le nombre d'habitant.

Un **VILLAGE** est caractérisé par sa localisation, son nom, le nombre de forage qu'il possède, le nombre de forage fonctionnels et non fonctionnels, sa superficie, le nombre d'habitant.

Un **FORAGE** est caractérisé par ses coordonnées, sa date de mise en oeuvre, le débit de développement, le débit air lift, son altitude, la côte de l'épaisseur d'altérite, la profondeur forée, la profondeur du socle, la côte supérieure de venue d'eau, la côte inférieure de venue d'eau.

La **LITHOLOGIE** du forage est caractérisée par le nom et la nature de la roche encaissante.

Les **PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES** sont la porosité, la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement, la perméabilité des aquifères et la perméabilité des altérites. La **CHIMIE** est caractérisée par le nom des paramètres analysés. Ce sont le PH, la température, le taux de turbidité, la couleur de l'eau, la conductivité, le taux de saturation, le taux d'ammonium, le taux de calcium, le taux de magnésium, le taux d'oxygène dissous, le taux de fer total, le taux de nitrates, le taux de nitrites.

Le **COMITE DE GESTION** est caractérisé par les noms du responsable (président, secrétaire, trésorier), le prix de l'eau dans la localité et le coût mensuel d'entretien.

Un **ESSAIS DE POMPAGE** est caractérisé par la durée, le débit spécifique, le débit d'exploitation et le rabattement.

La **GEOPHYSIQUE** est caractérisée par les sites de réalisation de l'étude géophysiques et leurs coordonnées suivies des coupes de sondage.

Une **PIEZOMETRIE** est caractérisée par la date de campagne, les coordonnées de forages et le niveau statique de l'eau.

Un **EQUIPEMENT DU FORAGE** est caractérisé par le diamètre du PVC, la longueur totale de PVC, la longueur du PVC plein, la longueur de crépine, la profondeur équipée.

✓ **Identification des relations entre les classes d'objets**

L'identifiant d'une entité est choisi de façon à ce que deux occurrences (propriétés) de cette entité ne puissent pas avoir le même identifiant. Cet identifiant peut être une référence interne, un code, ou plus généralement un nombre entier. Cette propriété est soulignée afin de mettre en évidence son rôle d'identifiant. Ainsi, à toutes les entités désignées pour ce travail, nous avons donc ajouté un identifiant. A titre d'exemple l'entité VILLAGE a pour identifiant « Id\_Vill » et « Id\_Forag » a servi d'identifiant à l'entité FORAGE.

✓ **Spécification des liens (ou Associations) entre les différentes entités**

Elle consiste d'abord, à déterminer les relations de dépendances susceptibles d'exister entre les couples d'entités. Ensuite, choisir un verbe pour représenter chaque relation reconnue. Enfin, placer la relation dans le MCD, et la relier à chacune des entités mises en jeu dans cette relation.

✓ **Identification des cardinalités**

Elle consiste à analyser le rôle de chaque patte reliant une relation à une entité (ou une entité relative à une entité). Pour cela, deux questions sont posées :

- pour n'importe laquelle des occurrences de l'entité, peut-il y avoir 0 occurrence de la relation, ou doit-il y en avoir au moins une ?
- pour n'importe laquelle des occurrences de l'entité, peut-il y avoir n occurrences de la relation, ou doit-il y en avoir au plus une ?

Surmonter chaque patte du couple de réponses apportées : selon le cas, (0,1) ou (0, n) ou (1,1) ou (1, n). Une illustration est faite à la figure 13.

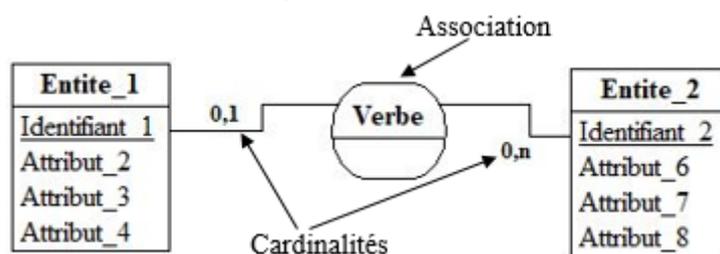


Figure 12 : Représentation graphique du formalisme Entité-Relation

Ainsi de proche en proche nous aboutissons au schéma conceptuel global de notre modèle. Il est important de souligner que jusqu'à ce stade, toute cette analyse s'est déroulée totalement indépendamment des ordinateurs et de toute contrainte logicielle.

### ✓ Production du schéma conceptuel

Le MCD conçu selon le formalisme Entité-Relation est ensuite élaboré à partir du logiciel Sybase Power AMC 9.5. Pour les entités spatiales, on ajoute ensuite un pictogramme de référence spatiale. La structure d'ensemble du modèle est représentée graphiquement par le diagramme Entité-Relation. La symbolisation de ces éléments (Figure 14) dans le modèle conceptuel, facilitera la compréhension du rôle de chacun d'eux.



**Figure 13:** Symbole des éléments du schéma Entité-Relation

Les liens entre les entités sont marqués par des verbes représentés par des figures ovales sur le MCD. Pour éviter que le système fasse une confusion et qu'il ne puisse réaliser correctement les requêtes, il a fallu différencier ces relations les unes des autres à partir de pictogrammes.

### 4.1.3.2 Modélisation logique des données (MLD)

Le modèle logique relationnel est la seconde étape dans la conception du SIRS. Le MLD organise les données du MCD afin de permettre leur traduction en modèle physique et dépend de la structure du SGBD, qui peut être hiérarchique, réseau, relationnelle ou orientée-objet. Le type de SGBD utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle relationnel et le MLD correspondant est donc, pour cette raison, appelé Modèle Logique de Données Relationnelles (MLDR).

### ✚ Modèle relationnel

Le modèle relationnel est un modèle ensembliste simple (Codd, 1970). Il supporte des ensembles d'enregistrements aussi bien au niveau de la description que de la manipulation. Ce modèle est toujours à la base de nombreux systèmes. Il est fondé sur la théorie mathématique des relations construites elles-mêmes sur celles des ensembles. Pour Badard (1996) cité par

Konan-Waidhet (2007), il permet de modéliser les données sous forme de tables à deux dimensions avec les caractéristiques suivantes :

- une table relationnelle est un fichier composé d'un ensemble de colonnes et de lignes ;
- les colonnes ou champ correspondent aux attributs des entités ;
- les lignes de la table correspondent à des enregistrements des valeurs d'attributs.

Les tables sont donc les structures dans lesquelles seront stockées les données. La structuration relationnelle suit un certain nombre de règles ou formes normales.

### **Normalisation des données**

La structuration relationnelle consiste à organiser des données sous forme de tables en suivant un certain nombre de règles ou formes normales. Une forme normale est un ensemble de contraintes que doit respecter un schéma de table. Le respect d'une forme normale pour la construction d'une base de données permet d'optimiser le stockage et de faciliter l'évolution de la base de données sur le long terme. Le processus de construction du schéma d'une base de données conformément à une forme normale est appelé la « normalisation » des données (Meijerink *et al.*, 1994). On distingue les formes normalisées suivantes : la Première Forme Normale, la Deuxième Forme Normale, la Troisième Forme Normale, la Forme Normale de Boyce Codd, la Quatrième Forme Normale et la Cinquième Forme Normale. Toute forme normalisée de niveau supérieur est un sur-ensemble des formes normalisées de niveau moins élevé, ce qui signifie que si la base de données est conforme à la troisième forme normale, alors elle l'est également vis-à-vis de la première et de la seconde. La plupart des bases de données se trouvent dès leur conception sous la troisième forme normale. En d'autres termes, la normalisation consiste à effectuer une série de tests pour éliminer les données redondantes et vérifier que les données sont associées à l'entité ou à la relation appropriée. Elle permet également d'améliorer la cohérence des données. Par exemple, si vous enregistrer l'adresse d'une personne dans plusieurs emplacements, il sera difficile de la mettre à jour si cette personne change d'adresse.

### **Représentation des tables relationnelles**

Il existe deux modes de représentation des tables relationnelles. Toutefois, le mode (= schéma de la relation) qui représente uniquement la structure et consiste à montrer uniquement le nom de la relation, sa clé primaire ainsi que les attributs qui y sont reliés, a été retenu. Il se présente selon le formalisme suivant : Nom (Clé primaire, Attribut 1, Attribut 2, ..., Attribut N).

Voici par exemple la relation qui renseigne sur les PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES : PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES (Id\_Hydrody, T, C\_Emmg, Permea\_Aquif, Porosite, Permea\_Alt).

#### 4.1.3.3 Liens entre les tables

Un lien est une association entre deux tables. Ces liens sont exprimés à l'aide de clés primaires et étrangères (Figure 15). Une clé primaire est un champ dans une table dont les valeurs identifient de façon unique chaque ligne ou enregistrement de la table. Tandis qu'une clé étrangère est un champ dont les valeurs sont les mêmes que la clé primaire d'une autre table. Un lien est créé entre deux (2) tables relationnelles lorsqu'on fait correspondre les valeurs de la clé étrangère d'une table A avec celles de la clé primaire d'une table B.

**Clé primaire**

Id_Hydrody	T	K	Porosite	Qsp	Rabat
HYD1	0,0000	0,0000	3,5	0,1626	24,6
HYD10	0,0000	0,0000	0	0,4965	14,5
HYD11	0,0000	0,0000	0,5	0,5464	18,3
HYD12	0,0000	0,0000	0	0,1483	23,6
HYD13	0,0005	0,0000	0	0,2406	18,7
HYD14	0,0000	0,0000	5,3	2,6217	26,7

**Clé étrangère**

Id_Forage	Prof_	NS	Id_Hydrody
F1	66,23	24	HYD1
F10	23	28,54	HYD10
F11	50,81	10,2	HYD11
F12	12,8	13,6	HYD12
F13	31,03	16,23	HYD13
F14	12,8	6,8	HYD14

Figure 14 : Exemple de clé primaire et secondaire

L'attribut Id\_Hydrody est à la fois clé primaire dans la table PARAMETRE HYDRODYNAMIQUE et clé étrangère dans la table FORAGE. Les clés sont fondamentales dans une base de données relationnelles parce qu'elles permettent de relier les tables entre elles.

### 4.1.3.4 Propriétés des tables relationnelles

Chaque position ligne/colonne doit avoir une seule valeur. Les valeurs dans les colonnes doivent être de même type (appartenir au même domaine).

Chaque ligne est unique, c'est-à-dire que deux lignes ne peuvent pas avoir des valeurs identiques.

Chaque colonne doit avoir un nom unique. La séquence des colonnes (de gauche à droite) n'a pas d'importance (c'est-à-dire que les données peuvent être accédées dans n'importe quel ordre).

### 4.1.3.5 Traduction du MCD en MLDR

Le passage du modèle conceptuel des données au modèle logique des données relationnelles se traduit de la manière suivante :

- toute entité du MCD devient une relation du MLD et donc une table de la base de données ;
- chaque propriété de l'entité devient un attribut de cette relation et donc une colonne de la table correspondante ;
- l'identifiant de l'entité devient la clé primaire de la table (elle est donc soulignée). La traduction du MCD en MLD suit un certain nombre de règles qui dépendent des cardinalités entre les entités de part et d'autre des associations (Figure 16) :
- les associations de cardinalités réduites différentes de (N, N) ne deviennent pas des tables. Ce sont des associations de père et fils. L'identifiant du père migre du côté du fils pour devenir une clé étrangère ;
- par contre l'association est de cardinalité (N, N) deviennent des tables. Leur identifiant est la concaténation des identifiants des entités qui participent à l'association. Si elle est porteuse de propriétés, ces dernières deviennent des attributs de la table.

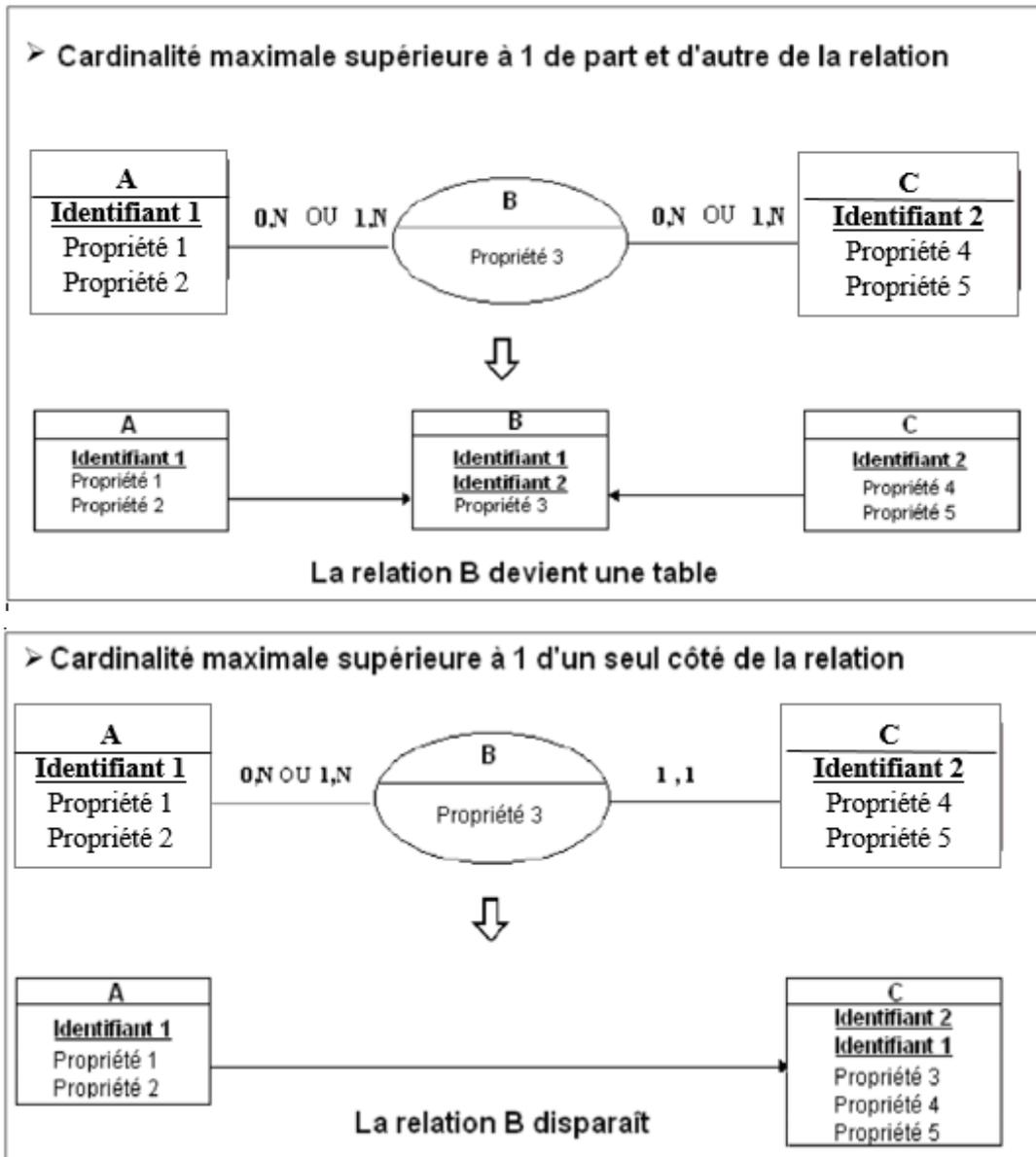


Figure 15 : Schema traduisant le passage du MCD au MLDR

#### 4.1.3.6 Dictionnaire des données (DD)

Une description détaillée des entités, des attributs et des relations est indispensable, si l'on veut permettre à tout utilisateur et en tout temps de comprendre le MCD et le MLD pour modifier ou utiliser le SIRS.

Le dictionnaire des données donne pour chaque table du MLD une description de la table et de ses attributs. Il s'agit en fait d'une liste récapitulative des données.

Chaque attribut (champ) du dictionnaire des données peut être caractérisé par les propriétés suivantes (Tableau I) :

**Tableau I** : Caractéristique du dictionnaire des données

<b>Propriété</b>	<b>Signification</b>
Mnémonique	Abréviation du nom de l'attribut.
Libellé	Libellé contenant la signification précise et le rôle de l'attribut.
Type de donnée	Type de l'attribut : entier, réel, chaîne de caractères, date...

#### 4.1.4 Réalisation du prototype

Nous avons utilisé un système de gestion de bases de données relationnelles (*Access 2007*) et un logiciel SIG (*ArcGis 10.4*) pour réaliser l'application.

L'objectif étant de montrer quelques possibilités qu'offre le SIRS dans le traitement des données. Il donne ainsi une idée de l'outil.

Le développement du prototype s'est réalisé en plusieurs étapes :

- tout d'abord, une base de données descriptive a été réalisée sous Microsoft Access permettant de regrouper et de faciliter ainsi la gestion de ces informations ;
- ensuite, la numérisation de certaines données sur ArcGis a permis de définir des supports cartographiques et des objets spatiaux ;
- enfin, le regroupement des données descriptives et cartographiques a abouti à la création du prototype de démonstration

##### 4.1.4.1 Implantation du modèle physique des données (MPD)

Le niveau physique correspond à la définition des structures physiques des données d'accès. Le modèle physique exprime la structure logique de la base de données et constitue un passage de la description conceptuelle à l'implantation de la base de données.

##### **Implantation des tables descriptives sous Microsoft Access**

Access est un système de Gestion de Base de Données Relationnel qui permet d'enregistrer, de gérer des systèmes d'informatiques dans l'environnement graphique de Windows. Ainsi, Après l'élaboration du modèle conceptuel ou physique, la création de la base de données sous format Access est la phase finale dans la conception d'une base de données.

##### – **Saisie des données**

Access stocke les informations dans des tables. En général, une table est un groupe d'informations sur un domaine précis.

## MATERIEL ET METHODES

Elle est réalisée à partir du mode création dans une fenêtre Access (Figure 17). Cette fenêtre permet de donner un nom à la table et de préciser les différents champs. Un champ correspond à un des attributs retenus lors de la modélisation logique. Un attribut est caractérisé par un type de donnée (texte, numérique, date, etc.).

Pour chaque table, il faut indiquer la clé primaire en le matérialisant par le symbole d'une clé. Elle permet d'identifier clairement les enregistrements de la table et donc d'avoir des lignes différentes les unes des autres.

Nom du champ	Type de données	Description (facultative)
<b>Id_Forage</b>	Texte court	
Coord_ForagX	Texte court	
Coord_ForagY	Texte court	
Date_Creation	Date/Heure	
Debi_Develop	Texte court	
Epai_Alt	Texte court	
Prof_Forée	Texte court	
Prof_Socle	Texte court	
NS	Texte court	
Id_equip	Texte court	
Id_Chimie	Texte court	
Id_Ess	Texte court	
Id_piezo	Texte court	

Général	
Taille du champ	255
Format	
Masque de saisie	
Légende	
Valeur par défaut	
Valide si	
Message si erreur	
Null interdit	Non
Chaîne vide autorisée	Oui
Indexé	Non
Compression unicode	Non
Mode IME	Aucun contrôle
Mode de formulation IME	Aucun
Aligner le texte	Général

**Figure 16 :** Table "FORAGE" en mode creation sous ACCESS

Une fois la table créée, il est possible d'entreprendre des modifications, si cela s'avère nécessaire, en revenant en mode création. La saisie des données se fait en mode feuille de données (Figure 18).

Les en-têtes des colonnes correspondent aux différents attributs et les lignes représentent les enregistrements, c'est-à-dire chaque objet appartenant à une entité. La saisie de données supplémentaires se fait à la suite des lignes déjà remplies.

## MATERIEL ET METHODES

Id_Forage	Coord_F	Coord	Debi_I	Epai	Prof_Fc	Prof	NS
F1	272681	755421	4	3,87	70,1	66,23	24
F10	237886	731217	4,5	7	65	23	28,54
F11	231687	771188	1,84	4,57	55,38	50,81	10,2
F12	276700	706322	7,2	12,8	73,35	12,8	13,6
F13	276929	736937	3,6	40,04	71,07	31,03	16,23
F14	245112	744458	4,5	12,8	73,35	12,8	6,8
F15	227983	772810	2	10,4	90,27	80,23	16,5
F16	273653	744763	2,11	25,15	50,27	25,12	6,5
F17	290436	707768	0,57	12,8	73,35	35	35,37
F18	260207	771572	10,08	3,64	61,6	57,96	15,25
F19	262809	720601	4,2	31,42	61,74	30,32	2,39

**Figure 17 :** Table "FORAGE" en mode feuille de donnée

### – Relations

Il existe plusieurs raisons pour former des relations entre tables avant de créer de nouveaux objets de base de données, tels que des formulaires, des requêtes et des états. Les relations entre tables renseignent les composants de formulaires et d'états. Lorsque nous concevons un formulaire ou un état, Access exploite les informations des relations entre tables que nous avons déjà définies pour nous proposer divers choix pertinents. Les relations entre tables nous autorisent d'appliquer l'intégrité référentielle pour éliminer les enregistrements orphelins dans notre base de données (c'est un enregistrement qui fait référence à un autre enregistrement qui n'existe pas).

### – Formulaires

Après avoir saisi toutes les données nécessaires dans notre base de données, il est nécessaire de définir les utilités d'un formulaire. Les formulaires servent à mieux présenter l'information qui se retrouve dans les différentes tables. Il est aussi plus pratique d'introduire l'information dans un formulaire que directement dans une table ou une requête. Aussi, il est possible d'afficher seulement les champs qui sont nécessaires à l'écran. Ceci permet à l'utilisateur du formulaire de voir le contenu.

### Connexion de la base de données Microsoft Access dans ArcGIS

La connexion de la base de données MS Access vers ArcMap se fait via une connexion OLE DB. En termes de définition, OLE DB est un module de partage de données entre des

applications, nous autorisant de communiquer la base de données Access dans ArcMap. Pour maintenir l'intégrité des données, nous devons changer l'extension \*.accdb vers l'extension \*.mdb dans Access. Et toutes les bases de données Microsoft Access (.mdb) seront affichées et accessibles à l'aide d'ArcCatalog.

### **Implantation des tables à référence spatiale sous ArcGIS**

Le SIG ArcGIS permet l'implantation de différents types de tables (primaire et secondaire). Pour la création des tables contenant des objets spatiaux, il faut définir un système de projection, l'extension géographique et la structure de la table qui contiendra les attributs décrivant les objets géométriques. Une table contenant des objets spatiaux est aussi appelée « couche ».

#### **4.1.4.2 Implantation des tables primaires Sous ArcGIS**

On appelle "table primaire" toute table du modèle logique dont les objets peuvent être représentés graphiquement. Ces objets sont de type ponctuel, linéaire ou surfacique conformément au(x) pictogramme(s) indiqué(s) sur les entités du modèle conceptuel. Mis à part les références spatiales, ces tables contiennent également des renseignements non spatiaux exprimés par les attributs qu'elles contiennent. L'implantation des objets spatiaux a été réalisée en numérisant des éléments de types vecteurs à partir d'un fond de carte topographique. Les étapes de création d'une table dans ArcGIS débutent par une définition des différents champs ou attributs de chaque table spatiale. La définition de la table consiste à préciser le type de données (entier, réel, chaîne de caractères...), leur taille (ou largeur) en fonction du nombre de caractères à saisir. Une fois les champs définis, on nomme la table et on peut commencer à saisir les objets (= numériser), si et seulement si la couche (ou table primaire) est en mode d'édition de données.

#### **4.1.4.3 Implantation des tables secondaires**

Les tables secondaires regroupent l'ensemble des tables qui n'ont pas de références spatiales et qui contiennent des informations relatives à la problématique. Ces tables peuvent être créées de la même manière que les tables primaires, mais les moyens d'exploitation sont limités, ArcGIS n'étant pas un véritable SGBD. Ces tables sont donc gérées directement sous Access pour la création et les mises à jour, puis on les importe ensuite sous ArcGIS.

### 4.1.4.4 Réalisation des requêtes

Le but de cette partie du travail est de tester et de démontrer les capacités du prototype dans la réalisation des requêtes. Les requêtes présentées sont effectuées sur des tables spatiales et non spatiales.

Une requête est une question adressée à la base de données dans le but de visualiser, trier, modifier ou analyser les données.

Une base de données doit permettre à ses utilisateurs d'en extraire tous les renseignements dont ils ont besoin. La manipulation des bases de données relationnelles est facilitée par le langage SQL.

Au niveau physique, ce sont des opérateurs algébriques (sélection, union, intersection, différence, jointure, etc.) qui permettront de formaliser des requêtes et de reconstituer alors des relations entre les tables. En utilisant ce type de langage, un utilisateur n'a pas besoin de connaître les détails d'implémentation des opérateurs algébriques pour obtenir une exécution optimisée de ses traitements (David, 1991).

Lorsque les données proviennent d'une seule et même table, on parle de « projection » ou de « sélection ».

La projection permet de ne retenir que certains attributs spécifiés d'une relation alors que la sélection permet de ne retenir que les n-uplets répondant à une condition exprimée à l'aide des opérateurs arithmétiques ( $=$ ,  $>$ ,  $<$ ,  $>=$ ,  $<=$ ,  $<>$ ) ou logiques de base (Et, Ou, Non).

Pour interroger une base de données relationnelle impliquant plusieurs tables, il faut faire recours à des jointures pour raccorder des éléments d'information apparaissant dans ces différentes tables.

L'interrogation des données spatiales et non spatiales a été combinée et le résultat des requêtes est aussi une table qui va contenir la ou les réponses à la question posée. Ce résultat peut être représenté sous forme de graphiques ou de cartes thématiques.

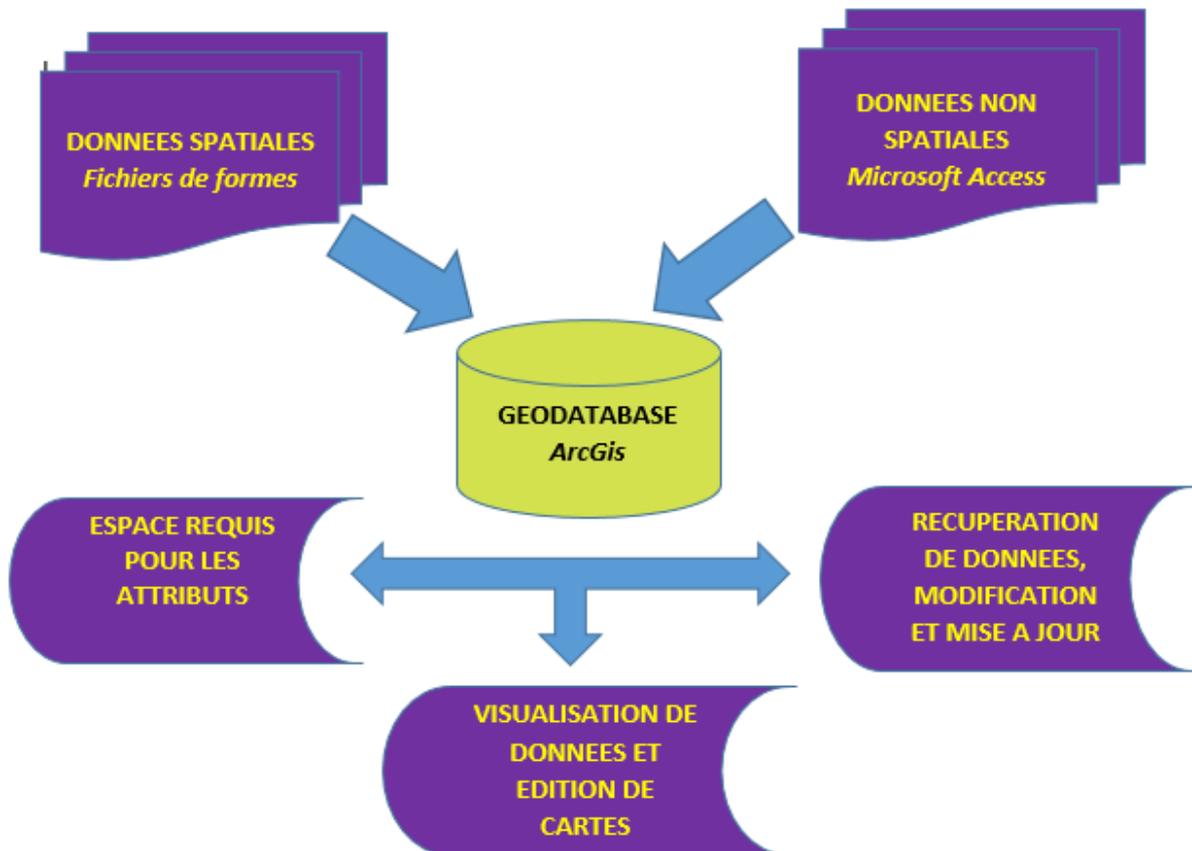
Seules les clauses SELECT, FROM et WHERE ont été utilisées lors des requêtes. A ces clauses, s'ajoutent des fonctions comme le calcul de rapport, les opérateurs arithmétiques et logiques. Les requêtes SQL élaborées se présentent sous la forme suivante :

```
SELECT liste d'attributs {nom des champs}, FROM table 1, table 2, t... {nom des tables},  
WHERE table 1. attribut 1 = table 2. attribut 1 AND table 2. attribut 2 = table 3.attribut 2 AND  
... ;
```

Ainsi, il convient de noter que la démarche ainsi adoptée est celle d'une géodatabase (base de données géographique). En effet, les géodatabases possèdent les fonctionnalités des bases de

données relationnelles, tout en intégrant les données spatiales. Elles offrent ainsi, la possibilité de traiter à la fois des informations spatiales et descriptives dans une application unique.

La figure 19 est le schéma explicatif de la base de données et toutes les opérations qui peuvent être effectuées.



**Figure 18 :** Schéma conceptuel de la base de données géographique

#### 4.2 Analyse statistique des paramètres de forages

L'objectif de cette partie est d'identifier, parmi les paramètres techniques des forages, ceux qui sont susceptibles d'influencer d'une manière générale les potentialités en eau souterraine de la zone. Elle se fera sur les différents types de formations géologiques rencontrés dans la zone d'étude. Elle a pour but de réunir le maximum d'informations en un point de la zone considérée en vue d'une implantation judicieuse des points d'eau (Dibi *et al.*, 2004).

Il s'agit d'abord de déterminer la formation la plus productive dans la région et de rechercher les paramètres susceptibles d'influencer la productivité ou la disponibilité de l'eau dans les aquifères. Nous avons utilisé la méthode d'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) pour l'identification de ces paramètres. La matrice de corrélation qui en résulte expose le degré d'accointances des éléments en présence. La corrélation peut être positive et exprimer une union ou négative et démontrer une divergence. La corrélation maximale est 1 et la

minimale est 0. Elle donne la liaison qui existe entre toutes les variables deux à deux. La corrélation entre deux éléments est très bonne si elle est proche de 1.

Cette même méthode a été appliquée par Kouadio (2005) pour rechercher les paramètres susceptibles d'influencer la profondeur des ouvrages.

### 4.2.1 Analyse des données

Les données utilisées sont : Q (Débit),  $Q_s$  (Débit Spécifique), EA (Epaisseur d'Altérites), Pt (Profondeur totale), T (Transmissivité), le coefficient d'emmengasinement et NS (Niveau Statique). Ces données ont été sélectionnées à la suite d'une analyse critique basée sur leur répartition spatiale et leur homogénéité. Sur cette base, les fiches techniques de 100 forages avec 60 fiches d'essais de pompage ont été utilisées. Les différents paramètres ont été soumis aux traitements statistiques afin de déterminer les valeurs extrêmes (minimum et maximum), la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation.

Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart-type à la moyenne. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Il est généralement exprimé en pourcentage. Sans unité, il permet la comparaison de distributions de valeurs dont les échelles de mesure ne sont pas comparables. Plus la valeur du coefficient de variation est faible, plus l'estimation est précise. Selon la valeur de CV, on peut caractériser la série comme suit (Oula, 2011) :

- si  $CV < 0,02$ , la série est dite très homogène ;
- si  $0,02 < CV < 0,25$ , la série est dite homogène ;
- si  $CV > 0,25$ , la série est dite hétérogène.

#### 4.2.1.1 Débit ( $m^3/h$ )

Il s'agit du débit d'exploitation du forage. Il est déterminé après un essai de pompage qui doit logiquement être de longue durée pour mieux estimer les réserves de la nappe et faire une bonne proposition. Ceci n'est pas généralement le cas pour les forages d'hydraulique villageoise (HV). En Côte d'Ivoire, d'une manière générale, les débits acceptés pour l'équipement d'un forage sont de  $1 m^3/h$  pour l'hydraulique villageoise et de  $3,5 m^3/h$  pour l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) (DHH, 2001).

Toutefois, des forages sont souvent équipés pour des débits d'exploitation inférieurs à  $1 m^3/h$ , surtout au niveau de l'hydraulique villageoise en fonction des besoins des usagers. Dans les

départements de Yamoussoukro et de Toumodi, quelques forages ont été équipés avec un débit inférieur à  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Pour mieux apprécier la distribution des débits d'exploitation (Q) de forage (HV), le Comité Inter-Africain d'Études Hydrauliques (C.I.E.H.) a proposé une classification (Lasm, 2000) :

- de 0 à  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  : débits très faibles
- de 1 à  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$  : débits faibles
- de  $2,5$  à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  : débits moyens
- supérieur à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  : débits forts.

### **4.2.1.2 Profondeur totale de l'ouvrage (m)**

Dans le cadre de cette étude, la profondeur totale de l'ouvrage représente la profondeur effectivement équipée. Cette profondeur peut varier en fonction de plusieurs paramètres tels que la topographie, la nature de la formation, l'existence ou non des fissures, etc..... Des études déjà effectuées (Yaméogo, 1988 ; Dibi, 2008) ont fixé cette profondeur généralement entre 70 et 80 m, car selon ces mêmes études, l'existence de fractures devient rare au delà de cette profondeur. Cependant, des débits d'exploitation très importants peuvent être obtenus au-delà de cette profondeur. Dans le département de Yamoussoukro et de Toumodi, les forages sont souvent de grande profondeur allant parfois jusqu'à 110 m.

### **4.2.1.3 Niveau statique (m)**

Il représente le niveau de l'eau dans l'aquifère. Dans le cas des nappes captives, lorsque le niveau statique est au dessus du toit de la nappe, il peut donner naissance à une nappe artésienne. Dans les aquifères fissurés, il se limite le long des fractures (Yaméogo, 1988). Il pourrait varier profondément en fonction de l'épaisseur d'altération (Biemi, 1992). Il permet une meilleure évaluation et une bonne gestion des ressources en eau souterraine (Soro, 2002).

### **4.2.1.4 Epaisseur d'Altérites (m)**

L'épaisseur d'altérites indique la frange de l'altération de la roche-mère. Elle varie d'un point à un autre en fonction de la nature de la roche mère, des conditions climatiques et l'importance de la fracturation (Yaméogo, 1988). Elle représente le premier lieu de transit des eaux d'infiltration en provenance des précipitations vers les nappes. Elle constitue souvent un réservoir aquifère exploité par les puits traditionnels. Toutefois, du fait de son accès facile aux

## MATERIEL ET METHODES

polluants et de son exposition aux fluctuations saisonnières, ces aquifères sont délaissés au profit des aquifères de fissures (Équation 8).

$$EA = nL + l - (l_0 + Ht) \quad (\text{Equation 8})$$

EA : Epaisseur d'altérites (m) ; n : nombre de tiges utilisées dans les altérites ; L : longueur de chaque tige utilisée (m) ; l : longueur de l'outil utilisé généralement le tricône (m) ; l<sub>0</sub> : le reste de la tige au dessus de la table (m) ; Ht : Hauteur de la table (m).

### 4.2.1.5 Transmissivité (m<sup>2</sup>/h)

La transmissivité représente le temps que met l'eau pour traverser une unité de surface. Elle peut nous renseigner sur la perméabilité du milieu. Selon que cette valeur est élevée ou faible, l'aquifère peut être jugé bon ou mauvais. L'interprétation des données des essais de pompage consiste à déterminer les paramètres hydrodynamiques des aquifères tels que la transmissivité, l'emménagement et la perméabilité (De Marsily, 1981). La détermination de la transmissivité fait appel à plusieurs méthodes qui nécessitent que le rabattement soit mesuré pour toute procédure d'évaluation.

La transmissivité peut être déterminée tant avec les données de la remontée qu'avec celles de la descente. Dans le cas de la descente, les valeurs de la transmissivité pourraient être biaisées par les incertitudes de mesures dues aux pertes de charges quadratiques (De Marsily, 1985) atteignant quelques fois les 50% (Lasm *et al.*, 2008). Au contraire, les valeurs de transmissivités obtenues par la méthode de la remontée sont beaucoup plus significatives (régime non influencé). C'est pourquoi, nous choisirons dans cette étude la méthode de la remontée de Cooper-Jacob (1946) pour la détermination de la transmissivité. Elle part de la détermination du rabattement résiduel (S<sub>r</sub>) obtenu selon l'équation 9.

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln \frac{4Tt}{(r)^2 S'} - \ln \frac{4Tt'}{(r)^2 S'} \right] \quad (\text{Equation 9})$$

Avec S<sub>r</sub> rabattement résiduel (m), r distance entre le piézomètre d'observation et l'ouvrage (m), S' coefficient d'emménagement de la remontée (sans unité), S coefficient d'emménagement de la descente (sans unité), t temps depuis le début du pompage (s ou min ou h), t' temps à la fin du pompage (s ou min ou h) et Q débit de la remontée (moyenne des débits du pompage) en m<sup>3</sup>/h. En supposant que S = S', on obtient selon les équations 10 et 11, les expressions de S<sub>r</sub> et T.

$$S_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Equation 10})$$

On obtient :  $T = \frac{0,183Q}{\alpha}$  (Equation 11)

Avec  $\alpha$ , la pente de la droite obtenue en représentant  $S_r$  en fonction de  $\log t/t$  ( $S_r = f(\log(t/t'))$ ) sur du papier semi-logarithmique ( $t/t'$  est porté en échelle logarithmique). Cette méthode permet de calculer uniquement la transmissivité.

La transmissivité peut situer sur la perméabilité du milieu. Selon que cette valeur est élevée ou faible l'aquifère peut être jugé bon ou mauvais.

Pour mieux apprécier la distribution de la transmissivité, une classification de celle-ci a été établie et se présente comme suit (Lasm, 2000) :

- classe faible :  $T < 10^{-5}$  ;
- classe moyenne :  $10^{-5} < T < 10^{-4}$  ;
- classe forte :  $T > 10^{-4}$

#### 4.2.1.6 Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement, est le volume d'eau libérée ou stockée par l'aquifère. Les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions. Selon Lasm (2000), cette situation n'empêche cependant pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages, qui donnent des résultats significatifs et représentatifs des aquifères quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques. En effet, à l'arrêt du pompage, l'eau souterraine continue de s'écouler en direction de l'ouvrage de captage. Le niveau de l'eau dans le forage remonte et simultanément le niveau piézométrique de la surface de dépression s'élève. Dans ces conditions, le rabattement résiduel  $S_r$  obtenu s'écrit selon l'équation 12 : unité d'aire horizontale de l'aquifère par unité de variation du gradient hydraulique.

$$s_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{S' r^2} \quad (\text{Equation 12})$$

$S_r$ : rabattement (m),  $T$ : transmissivité ( $m^2/s$ ),  $r$ : rayon du forage (m),  $Q$ : débit de pompage ( $m^3/s$ ),  $S'$ : coefficient d'emmagasinement,  $t$ : temps de pompage (en s), l'expressions de  $S'$  est donnée par l'Equation 13.

$$S' = \frac{2,25Tt}{r^2} \quad (\text{Equation 13})$$

Ce coefficient quantifie le volume d'eau stocké dans le réservoir et éventuellement disponible à l'exploitation.

#### 4.2.1.7 Déterminaion du débit spécifique

L'estimation de la productivité des aquifères, à partir du débit spécifique est meilleure, car les mesures de  $Q/s$  représentent les réelles caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère par rapport à la transmissivité (Fossou, 2010). La déterminaion du débit spécifique appuie sur le fait que les valeurs de transmissivité sont obtenues à partir de l'interprétation de formules théoriques. Toutefois, les valeurs de  $Q/s$  peuvent être entachées d'erreurs si elles sont mesurées sur des forages isolés comme c'est le cas en Côte d'Ivoire, du fait des pertes de charges quadratiques intervenant lors de la mesure du rabattement. Le débit spécifique est obtenu en faisant le rapport entre le débit moyen ( $Q$ ) et le rabattement ( $s$ ) selon l'équation 14 (Fossou, 2010).

$$Q_{sp} = \frac{Q}{s} \quad (\text{Equation 14})$$

Avec,  $Q_{sp}$  = débit spécifique ( $m^3/h/m$ ),  $Q$  = débit moyen de fin de pompage ( $m^3/h$ ),  $S$  = rabattement de la nappe (m).

L'analyse des débits spécifiques a été faite selon la classification suivante :  $Q_{sp} < 0,1$  : débit spécifique faible ;  $0,1 < Q_{sp} < 1$  : débit spécifique moyen ;  $Q_{sp} > 1$  : débit spécifique fort.

#### 4.2.1.8 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche d'altérite

La méthode basée sur le principe de l'infiltration à charge constante a été utilisée. Cette méthode a connu du succès avec Koffi (2004), Kouamé (2007). La couche argilo sableuse se présente comme la zone de transfert des eaux d'infiltration vers la nappe. Ce test permet de mesurer la conductivité hydraulique à saturation d'un sol, celle-ci définissant l'aptitude du sol à permettre l'infiltration de l'eau. L'appareil est composé de deux anneaux de diamètres 30 et 50 cm enfoncés dans le sol de quelques centimètres (5 cm) et rempli d'eau. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps. Durant toute la mesure, on doit veiller à ce que les niveaux d'eau dans les deux anneaux restent les mêmes (au besoin, on modifie celui de l'anneau externe). On 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. C'est de la valeur de cette vitesse que l'on déduit la valeur du coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy (équation 15).

$$Q = K.S.\frac{H}{L} \quad (\text{Équation 15})$$

Avec :

Q = Quantité d'eau percolée (mm<sup>3</sup>/h) ; H = Charge d'eau (mm) ; L = Longueur de la colonne de terre (mm) ; S = Surface de la section de la colonne (mm<sup>2</sup>) ; K = Conductivité hydraulique (mm/h).

La loi de Darcy est appliquée à une colonne de sol saturée soumise à un écoulement unidimensionnel dans un milieu homogène et isotrope. Avec H/L : la pente hydraulique. A partir de l'équation de Darcy on obtient la conductivité hydraulique avec l'équation (16).

$$K = \frac{\pi.r^2.h'}{t.(2\pi.r.h+\pi r^2)} = \frac{r.h'}{t.(2h+r^2)} \quad (\text{Équation 16})$$

Avec :

r : rayon de l'anneau central ; h' : hauteur de la lame d'eau percolée (mm) ; t : temps écoulé (mn) ; h : hauteur de la colonne d'eau initiale (mm) 0,11 m.

#### 4.2.1.9 Détermination de la conductivité hydraulique de la couche fissurée

Dans l'optique de déterminer les propriétés hydrodynamiques associées à la zone fissurée de l'aquifère, nous avons considéré les essais par pompage (ou les paliers de débits) dans les forages où le niveau piézométrique avant pompage (ou avant le palier de débit) était situé dans la zone fissurée de l'aquifère, sous la base de la couche altérée. Pour le granite sain fissuré, la conductivité hydraulique a été déterminée au droit des forages qui captent les fractures situées dans cette zone. Le coefficient de perméabilité K est le paramètre qui exprime la capacité d'un terrain à laisser l'eau lui passer au travers. La perméabilité s'exprime en m/s. Son unité est celle d'une vitesse (LT<sup>-1</sup>). La transmissivité T, qui est en m<sup>2</sup>/s, exprime le débit d'eau qui s'écoule à travers une nappe d'épaisseur " e " et par mètre linéaire d'aquifère. C'est le produit du coefficient de perméabilité ou la conductivité hydraulique K par l'épaisseur "e" de l'aquifère. Ainsi donc, nous déduisons la conductivité hydraulique K selon l'équation 17 :

$$T = K.e \longrightarrow K = \frac{T}{e} \quad (\text{Équation 17})$$

Avec :

T : Transmissivité en m<sup>2</sup>/s

#### 4.2.1.10 Porosité

On appelle porosité d'une roche, le rapport des volumes des vides ou des pores avec le volume total de l'échantillon. Pour déterminer la porosité totale, on procède de la manière suivante :

- prélèvement à l'aide d'une tarière et transport des échantillons de sol de la zone d'étude au laboratoire pour analyse ;

## MATERIEL ET METHODES

- pour le prélèvement d'échantillons, on exerce une pression 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 ;
- au laboratoire, la méthode par saturation est utilisée pour déterminer la porosité totale ;
- après détermination du volume de l'échantillon sec et le volume des pores, la porosité totale est déterminée en appliquant les équations 18 et 19 :

$$V_t = V_s + V_p \quad (\text{Équation 18})$$

$$P_t = \frac{V_p}{V_t} \quad (\text{Équation 19})$$

Avec,  $P_t$  = Porosité totale,  $V_p$  = Volume des pores,  $V_s$  = Volume d'échantillon sec,  $V_t$  = Volume total.

### 4.2.2 Méthodes d'analyses des paramètres des forages

Pour mieux apprécier les débits susceptibles d'être fournis par ces forages et connaître l'influence des paramètres ci-dessus cités sur lesdits débits, deux types d'analyses ont été adoptés. Ces analyses ont consisté d'abord à identifier la formation la plus productive et à identifier par la suite les paramètres techniques des forages qui pourraient influencer la productivité des ouvrages ou l'existence des ressources en eau souterraine.

#### 4.2.2.1 Recherche de la formation la plus productive

Nous avons comparé les débits d'exploitation des ouvrages au niveau des principales formations que sont les schistes, les migmatites, les gneiss et les granites. L'influence des différents paramètres, pris de façon individuelle, sur la productivité a été aussi analysée. Il s'agit de la profondeur totale, de la profondeur des arrivées d'eau, de la transmissivité et de l'épaisseur d'altération.

#### 4.2.2.2 Sélection des paramètres influençant la productivité par l'ACPN

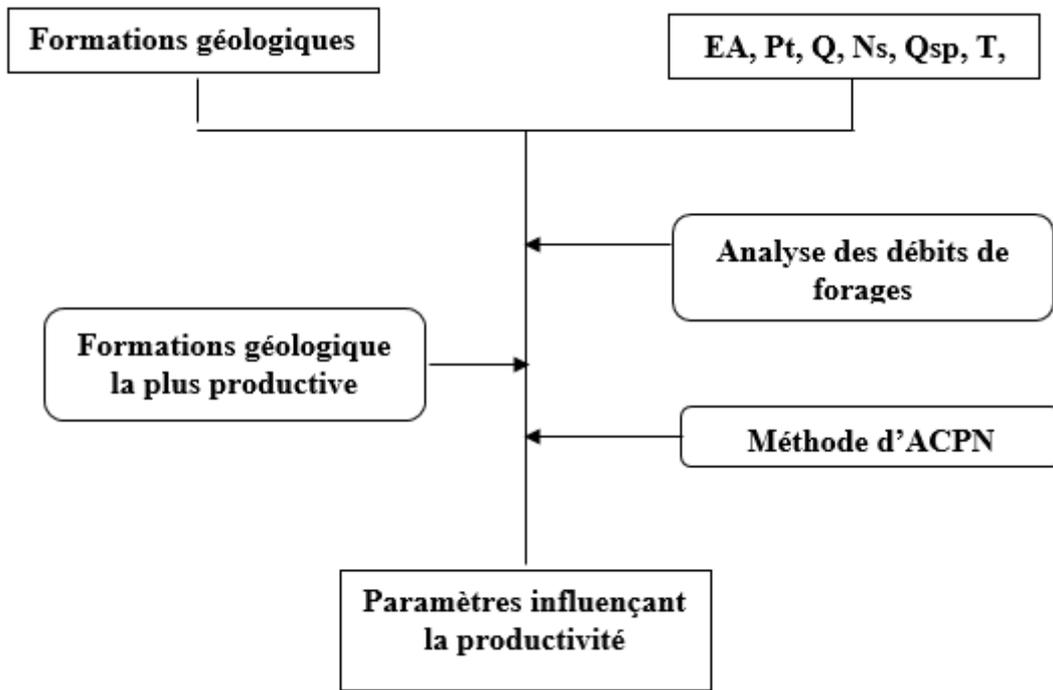
L'approche ACPN est basée sur l'établissement de corrélation entre l'ensemble de ces variables à partir d'une analyse statistique. Elle est utilisée pour les études englobant plusieurs paramètres dont les interprétations sont déterminantes pour la compréhension de certains phénomènes. Cette méthode permet de mettre en évidence les liens éventuels que présenteraient deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution. Les paramètres utilisés sont :  $Q$ ,  $Q_s$ ,  $EA$ ,  $P_t$ ,  $T$ ,  $S$  et  $NS$ . L'ACPN a été développée par Caillez et Pages (1976). Son utilisation pour cette étude est basée sur l'interprétation des différents facteurs de même que la matrice de corrélation

## MATERIEL ET METHODES

obtenue à la suite du traitement des données. Cette méthode a déjà fait l'objet de plusieurs applications surtout avec les paramètres physico-chimiques (Oga, 1998 ; Ahoussi, 2008). Le nuage de points résultant de ce traitement a été projeté dans les différents plans factoriels qui sont déterminés dans l'espace des variables et des unités statistiques. Le choix des principaux axes tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions est importante (75 % de l'inertie totale). En effet, deux variables sont corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,7. De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs c'est-à-dire proche de 1 (Dibi *et al.*, 2005). Si deux variables sont corrélées, elles sont engendrées par le même phénomène et varient dans le même sens. La présentation des résultats se fait en six tableaux dont trois seront exploités dans le cadre de cette étude. Il s'agit :

- du tableau de la matrice de corrélation entre variables qui permet de dégager les premiers paramètres qui sont corrélés ;
- du tableau des valeurs propres, pourcentage et cumul, qui donne le pourcentage exprimé par chaque facteur. Il permet de connaître le nombre de facteurs nécessaires pour l'interprétation de ces phénomènes à partir du pourcentage cumulé de ces différents facteurs ;
- du tableau des coordonnées des variables.

Une synthèse des différentes étapes de la recherche de la formation la plus productive et l'identification des paramètres influençant la productivité est présentée par la figure 20.



**Figure 19** : Schema de synthèse de l'analyse de la productivité

#### 4.2.3. Analyse géostatistique des paramètres hydrodynamiques

L'objectif de la géostatistique est de générer les estimations spatiales aux points non échantillonnés par l'estimation de l'erreur la plus faible (Rentier, 2002). Elle permettra d'élaborer des cartes de prédictions de la transmissivité, du coefficient d'emmengasinement et du débit spécifique. Ces cartes pouvant être des outils pour le choix de sites favorables à l'implantation de forages productifs.

L'approche de la modélisation géostatistique est basée sur le traitement statistique des variables régionalisées (Matheron, 1970). Plusieurs méthodes ont été développées pour ce type de traitement, mais la méthode du krigeage (Krige, 1951), développée par Matheron, reste la plus utilisée en géostatistique. C'est une méthode optimale d'estimation linéaire et non biaisée de la propriété observée. Elle est connue comme étant la seule, parmi les méthodes stochastiques ou déterministes, qui tient compte de la structure de dépendance spatiale des données (le variogramme) (Baillargeon, 2005). La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail a été approuvée par de nombreux auteurs (Rentier, 2002 ; El morjani, 2003 ; Jarar, 2009). Elle comporte quatre phases importantes ; une première phase d'analyse de données nécessaires pour une deuxième phase de modélisation géostatistique. Ensuite, la phase de validation croisée du modèle, et enfin, la phase de cartographie par Krigeage ordinaire.

### 4.2.3.1 Analyse exploratoire

L'étude exploratoire a pour but d'apprécier la distribution des données dans l'espace, d'appréhender leur degré d'homogénéité, de rechercher et de visualiser les observations atypiques ou tout simplement de se familiariser avec les variables (Jarar, 2009). Dans le cadre de cette étude, nous travaillons sur des paramètres hydrodynamiques (Transmissivité, perméabilité des aquifères et débit spécifique) caractéristiques des aquifères. L'histogramme de fréquence et la droite d'Anderson-Darling nous situera sur l'utilisation des valeurs brutes ou des logs. La distribution symétrique ou asymétrique a permis de mettre en évidence le caractère symétrique ou asymétrique des données. Quant à la d'Anderson-Darling, elle était axée sur l'analyse de la normalité de ces données.

### 4.2.3.2 Modélisation géostatistique

L'analyse variographique est une étape préalable au krigeage. Le variogramme expérimental est la clé de voûte de l'analyse géostatistique. Cette analyse permet de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance augmente et de préciser certaines caractéristiques qualitatives du milieu (continuité, anisotropie, régionalisation). Il s'agit de passer d'une fonction définie par des points à une fonction continue dans l'espace et possédant une expression mathématique.

#### ✓ Ajustement aux modèles théoriques

A partir de l'estimation du variogramme, deux objectifs sont en général assignés :

- déterminer les caractéristiques de la structure spatiale ;
- ajuster un modèle au variogramme expérimental.

L'interprétation rigoureuse des variogrammes repose sur l'ajustement de ceux-ci aux modèles théoriques existants (modèle exponentiel (Equation 20), modèle sphérique (Equation 21), modèle gaussien (Equation 22), modèle effet de pépite). Pour les variogrammes bornés à comportement linéaire à l'origine avec ou sans effet de pépite, les ajustements suivant les modèles exponentiels et sphériques sont préconisés (Razack, 1984).

Ces modèles doivent tenir compte des caractéristiques du variogramme expérimental à savoir :

- le comportement à l'origine et au voisinage de l'origine ;
- l'existence éventuelle d'un effet de pépite ;
- l'existence éventuelle d'un palier ;
- l'existence éventuelle d'une dérive du phénomène.

#### ✓ Modèle exponentiel

$$\gamma ( h) = C ( 1 - \exp(\frac{-h}{a})) + C' \quad (\text{Equation 20})$$

✓ **Modèle sphérique**

$$\gamma ( h) = C (\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} (\frac{h}{a})^3) + C' \quad \text{pour } h \leq a \quad (\text{Equation 21})$$

$$\gamma ( h) = C \quad \text{pour } h > a$$

avec :

a : la portée ;

h : la distance entre deux supports ;

C' : la pépite

C : le palier.

Les caractéristiques du variogramme, c'est à dire les paramètres de régionalisation pour un ajustement aux deux modèles précités ne sont pas nécessairement identiques.

✓ **Modèle gaussien**

$$\gamma ( h) = C ( 1 - \exp(- (\frac{h}{2a})^2)) + C' \quad (\text{Equation 22})$$

✓ **Modèle avec effet de pépite**

L'existence de l'effet de pépite se traduit par :

$$\gamma ( h) = 0 \quad \text{pour } h = 0$$

$$\gamma ( h) = \gamma_0 + C_0 \quad \text{pour } h > 0$$

$\gamma_0$  représente le modèle de variogramme sans effet de pépite et  $C_0$  est l'effet de pépite.

### 4.2.3.3 Validation croisée

Cinq critères statistiques (Équation 23, Équation 24, Équation 25, Équation 26 et Équation 27) sont utilisés par le logiciel ArcGis pour juger la qualité de l'estimation résultant du modèle utilisé :

- Erreur moyenne

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\check{Z}(si) - Z(si))'}{n} \quad (\text{Equation 23})$$

- Ecart-type de l'erreur réduite

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha(si))'}{n} \quad (\text{Equation 24})$$

- Moyenne de l'écart-type de krigeage

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\check{Z}(si) - Z(si)) / \alpha(si)}{n} \quad (\text{Equation 25})$$

- Moyenne de l’erreur réduite

$$\frac{\sum_{i=1}^n [(\check{Z}(si) - Z(si)) / \alpha(si)]}{n} \quad (\text{Equation 26})$$

- Ecart-type des erreurs d’estimation

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\check{Z}(si) - Z(si))}{n} \quad (\text{Equation 27})$$

$\check{Z}$  : La valeur que nous essayons de prédire pour un endroit,  $Z(si)$  : La valeur observée à l’endroit  $\alpha(si)$  : L’erreur standard de prédiction,  $n$  : Le nombre de points mesurés entourant la zone de prédiction.

Le modèle est considéré comme valable si l’erreur moyenne et la moyenne de l’erreur réduite sont proches de zéro, l’écart-type des erreurs d’estimation tend vers 1 et la moyenne de l’écart-type de krigeage est proche à l’écart-type de l’erreur réduite. En fonction des résultats, nous avons modifié les paramètres du modèle, puis testé le modèle par une nouvelle validation croisée jusqu’à l’obtention des valeurs optimales. Le choix du meilleur modèle sera guidé par la valeur de l’écart-type des erreurs d’estimation. Ainsi, le modèle ajustant au mieux le variogramme expérimental sera défini par celui qui aura la plus faible valeur (Lasm, 2000). Après l’analyse variographique, l’interpolation spatiale des valeurs brutes des paramètres a été réalisée à l’aide de la méthode de krigeage.

#### 4.2.3.4 Cartographie par krigeage

La méthode de krigeage ordinaire permet de reproduire au mieux la variabilité spatiale des paramètres étudiés (Transmissivité, coefficient d’emmengasinement des aquifères et débit spécifique). Cette technique permet de fournir un meilleur estimateur linéaire sans biais et de variance d’estimation minimale. Autrement dit, c’est un interpolateur exact au sens où, pour tout point échantillonné, la valeur estimée correspond exactement à celle mesurée.

De plus, cette technique fournit une indication sur l’erreur associée à chaque valeur estimée et permet d’établir, conjointement à la carte des valeurs, celle des erreurs d’estimation (El Morjani, 2003).

### 4.3. Détermination des zones potentiellement favorables à l’implantation de forages économiques

La réduction de moitié de la proportion de la population qui n’a pas accès de façon durable à un approvisionnement en eau de boisson salubre est l’un des objectifs de développement du millénaire (ONU, 2013). Afin d’atteindre un tel objectif, des approches radicalement différentes

## MATERIEL ET METHODES

comprenant une variété de solutions adaptées à chaque région doivent être envisagées. Un accent particulier devra être mis alors sur les solutions qui sont accessibles et qui permettent aux ménages et aux communautés de satisfaire leur besoin en eau potable. Les forages économiques à faible coût peuvent être une approche de solution. Cette approche a déjà démontré son efficacité en Asie, en Afrique et en Amérique latine, comme moyen d'augmenter le taux de couverture en eau potable (DHH, 2001). En effet, la réalisation des forages économiques est une solution pratique pour les points d'eau de 40 m de profondeur maximum dans des sols alluviaux ou des formations de roche altérée. Même si ce type de forage n'est pas une solution pratique dans toutes les formations géologiques, il y a néanmoins beaucoup de zones dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi où il peut efficacement fournir de l'eau potable aux populations rurales qui en sont dépourvues, à un coût très limité représentant une petite fraction du prix de revient d'un forage conventionnel (DHH, 2001). Elle vise à identifier les zones favorables où cette méthode peut être utilisée pour offrir de l'eau dans les zones qui ne sont pas toujours prises en compte par les programmes classiques d'hydraulique villageoise du fait que la priorité est souvent donnée aux grandes agglomérations.

L'approche méthodologique développée dans cette partie est celle proposée par (Jourda *et al.*, 2015). Elle peut être résumée comme suit :

- Identification des critères ;
- détermination de l'aptitude géologique ;
- détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur des arrivées d'eau les plus productives;
- analyse intégrée de ces données et estimation de l'aptitude hydrogéologique ;
- détermination de l'aptitude morphologique ;
- analyse intégrée des aptitudes morphologique et hydrogéologique.

Pour faciliter l'analyse et l'intégration des données, la méthode d'analyse multicritères a été adoptée. Elle favorise la combinaison des données en vue de l'obtention d'une décision composite sur l'emplacement optimal des zones favorables aux forages économiques.

### **4.3.1 Identification des critères**

Pour identifier les zones favorables, nous avons fait une estimation des conditions existantes dans les couches superficielles (maximum 40 m, c'est-à-dire la profondeur limite considérée pour la réalisation des forages économiques) en termes de dureté, perméabilité et de présence d'eau (Jourda *et al.*, 2015). Les aspects pris en considération pour déterminer le niveau d'aptitude sont :

## MATERIEL ET METHODES

- aptitude géologique : il s'agit d'identifier les zones où les couches superficielles ont des caractéristiques de dureté et de perméabilité favorables à la réalisation des forages économiques ;
- aptitude sur la base de la profondeur de l'eau : il s'agit d'identifier les zones où il est possible de trouver des venues d'eau exploitables pour une profondeur maximum de 40 m ;
- aptitude morphologique : elle porte sur la présence de zones avec des caractéristiques topographiques favorables (zones de bas-fonds ou zones de plaine) et la présence de couches d'altération des roches dures (de socle notamment). Ces couches peuvent avoir des caractéristiques (épaisseur, dureté et perméabilité) aptes pour l'exploitation avec des forages économiques.

### 4.3.2 Détermination de l'aptitude géologique

À partir de l'inventaire des lithologies de la carte géologique, une table de description des caractéristiques de la roche mère et de la couche d'altération a été établie pour chaque formation. Sur la base de ces trois paramètres (caractéristiques de dureté de la roche mère, épaisseur probable de la couche d'altération et perméabilité estimée de la couche superficielle), et en se référant aux études similaires réalisées par l'UNICEF dans des pays africains (2009, 2010a, 2010c, 2010d), une classification d'aptitude géologique a été effectuée :

- FO : zone à aptitude géologique forte (correspondante aux conditions de dureté et de perméabilité très favorables) sur la roche de la formation aquifère ;
- FO-a : zone à aptitude géologique forte sur la couche d'altération de la roche de la formation aquifère ;
- MO : zone à aptitude géologique moyenne (correspondant aux conditions de dureté et perméabilité moyennement favorables ou discontinues) sur la roche de la formation aquifère ;
- MO-a : zone à aptitude géologique moyenne sur la couche d'altération de la roche principale de la formation aquifère ;
- FA : zone à aptitude géologique faible, en général pas favorable.

### 4.3.3 Détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau

Pour estimer la profondeur de l'eau la plus probable dans les différentes zones des départements de Yamoussoukro et Toumodi, nous avons utilisé l'information sur les venues d'eau existant dans l'inventaire des points d'eau. En général, la profondeur de la venue d'eau et le niveau

## MATERIEL ET METHODES

piézométrique peuvent donner des indications qui ne sont pas représentatives de la profondeur réelle à laquelle on peut trouver des venues d'eau exploitables parce que le niveau piézométrique peut varier en fonction des saisons climatiques (Jourda et al., 2015). De plus, l'information sur les puits (qui captent les couches d'altération superficielles) est plus importante que sur les forages (qui captent les aquifères plus profonds que les puits), car il est possible que, dans les couches superficielles à faible productivité (moins de 40 m de profondeur), il y ait des venues d'eau exploitables par les puits et les forages manuels qui ne soient pas signalées dans les données des forages profonds (Jourda *et al.*, 2015). La carte de profondeur des venues d'eau établit une zonalité du territoire qui se base sur les profondeurs probables des venues d'eau exploitables par les forages manuels. Pour chaque zone, des classes des profondeurs des venues d'eau ont été définies. Pour la détermination de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau, une interpolation a été faite à partir de la carte des profondeurs d'arrivées d'eau dans les forages.

### **4.3.4 Evaluation de l'aptitude hydrogéologique**

La superposition de l'aptitude géologique et de l'aptitude en relation avec le niveau de l'eau, a permis d'évaluer l'aptitude hydrogéologique globale de la zone d'étude. L'aptitude hydrogéologique a été calculée à partir de la procédure suivante (Jourda *et al.*, 2015).

#### **✓ Transformation de l'aptitude géologique en valeur numérique :**

Il s'agit d'identifier les zones qui présentent des formations géologiques avec des caractéristiques de dureté et perméabilité favorables à la réalisation des forages économiques (Jourda et al., 2015) (tableau II).

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

**Tableau II:** Table descriptive de caractéristiques de la roche mère pour chaque formation géologique

<b>Lithologie</b>	<b>Dureté</b>	<b>Perméabilité</b>	<b>Aptitude géologique</b>
Alluvions récentes	faible	forte	forte
Amphibolites et amphibolopyroxénites	moyenne	moyenne	moyenne
Argilites	moyenne	moyenne	moyenne
Carbonates dominants	moyenne	moyenne	moyenne
Charnochite	moyenne	moyenne	moyenne
Conglomérats	faible	forte	forte
Conglomérats des socles archéens	faible	forte	forte
Dolérites/ Gabbro	forte	faible	faible
Erg fossile	forte	faible	faible
Formations néo-tchadiennes	faible	forte	forte
Formations paléo-tchadiennes	faible	forte	forte
Gneiss à pyroxènes ou à amphiboles	forte	moyenne	moyenne
Gneiss des socles archéens	forte	moyenne	moyenne
Granites archéens	forte	faible	faible
Granites post-tectoniques	forte	faible	faible
Granites éburnéens	forte	faible	faible
Granites syn-tectoniques	forte	faible	faible
Grès de Mouka-Ouadda	moyenne	moyenne	moyenne
Grès quartzitiques	moyenne	moyenne	moyenne
Micaschistes	moyenne	moyenne	moyenne
Orthogneiss	forte	faible	faible
Quartzites des socles éburnéens	forte	faible	faible
Quartzites dominants des socles archéens	forte	faible	faible
Quartzites ferrugineux	forte	faible	faible
Quartzites vitreux	forte	faible	faible
Schistes archéens	moyenne	moyenne	moyenne
Schistes carburés	moyenne	moyenne	moyenne
Schistes dominants des socles	moyenne	moyenne	moyenne
Schistes protérozoïques	moyenne	moyenne	moyenne
Formations néo-tchadiennes	faible	forte	forte

- aptitude forte et très forte = 1
- aptitude moyenne = 0,5
- aptitude faible et très faible = 0
- ✓ **Transformation de l'aptitude sur la base de la profondeur de l'eau en valeur numérique :**
  - favorable, avec profondeur de l'eau moins de 15 m = 1
  - partiellement favorable, avec profondeur de l'eau entre 15 et 25 m = 0,5
  - pas favorable, avec profondeur de l'eau plus de 25 m = 0

La superposition de l'aptitude géologique et de la profondeur de l'eau, a permis d'avoir la carte d'aptitude hydrogéologique.

Le calcul de la valeur numérique d'aptitude hydrogéologique, est fait selon l'Équation 28 (Jourda *et al.*, 2015) :

$$AH = (AG) \times (APE) \times 100 \quad (\text{Equation 28})$$

Avec :

AH : Aptitude Hydrogéologique ; AG : Aptitude Géologique ; APE : Aptitude de la Profondeur d'eau.

### 4.3.5 Evaluation de l'aptitude morphologique

La carte de pente du terrain (produite automatiquement à partir du modèle numérique de terrain) a permis d'obtenir la carte des classes de position topographique.

- Zone de bas-fond
- Zone à faible pente
- Zone à forte pente

La transformation de cette carte au moyen de l'application slope du logiciel ArcGis 10.4 a permis l'élaboration de la carte d'aptitude morphologique :

- morphologie très favorable : zone de bas fond, avec inclination < 2 degrés ;
- morphologie moyennement favorable : zone de bas fond, avec inclination entre 2 et 5 degrés, ou zones classifiées comme faible pente ;
- morphologie non favorable : zones de relief ou zones de pente supérieure à 5 degré

La dernière partie de la procédure d'analyse a nécessité de modifier la valeur numérique d'aptitude hydrogéologique pour prendre en considération la morphologie, et de calculer la valeur d'aptitude finale, selon la forme suivante :

- valeur d'aptitude dans les zones morphologiquement favorables = + 25

## MATERIEL ET METHODES

- valeur d’aptitude finale dans les zones morphologiquement non favorables = – 25
- pour les autres zones, la valeur de l’aptitude hydrogéologique n’a pas subi de modification.

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour apprécier l’effet de chaque paramètre retenu pour l’analyse multicritères et, par conséquent, pour la cartographie des zones favorables aux forages économiques. A cet effet, le test de sensibilité développé par Napolitano et Fabbri (1996) a été utilisé. Ce test permet d’analyser l’influence réelle de la pondération par rapport aux poids affectés à chaque paramètre de l’analyse multicritères. Dans cette analyse, le poids effectif est comparé à celui fourni par la modélisation de l’analyse multicritères. Le poids effectif (W) d’un paramètre est calculé à partir de l’équation 29 (Jourda et al., 2015) :

$$W = \frac{X_r \times X_w}{A} \times 100 \quad (\text{Equation 29})$$

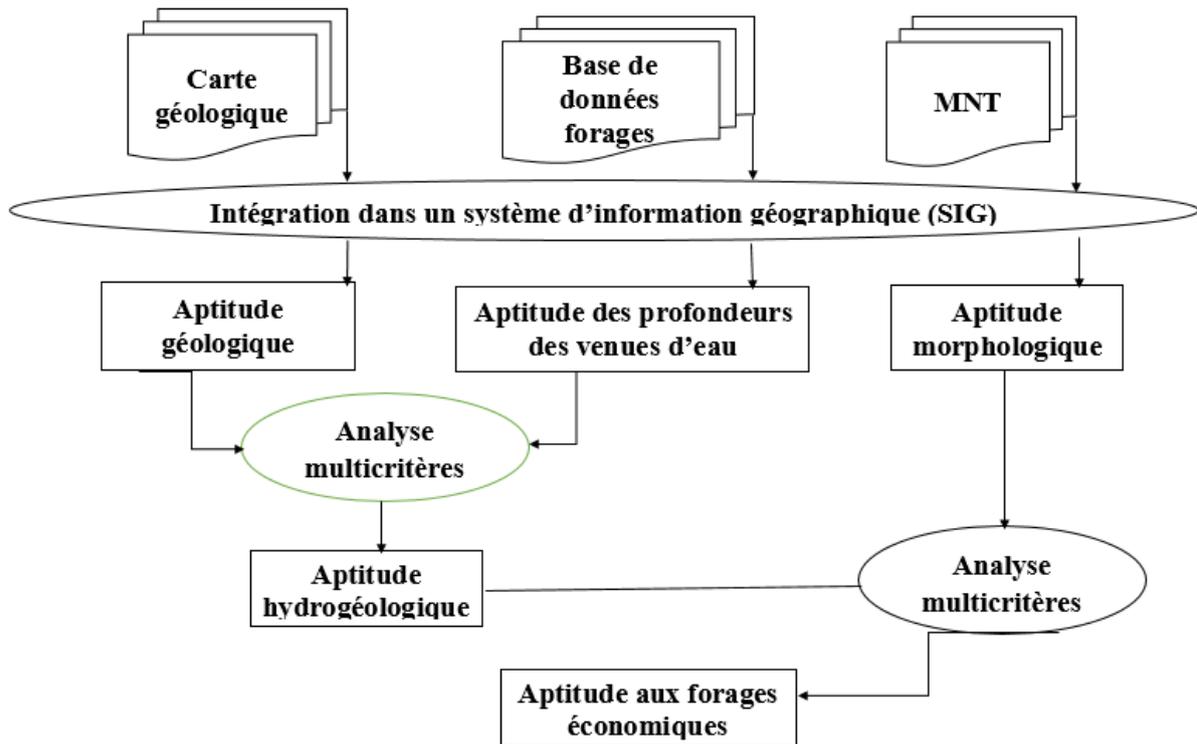
Avec  $X_r$  et  $X_w$  représentant respectivement la note et le poids assignés au paramètre X et A, l’indice de l’aptitude finale au forage du modèle.

Dans le cas de cette étude, tous les paramètres ont le même poids dont la valeur en pourcentage est 50 % pour chaque paramètre. Il faut noter que les notes assignées à chaque paramètre varient de 0 à 25. Pour l’aptitude finale aux forages économiques, la classification présentée au sein du tableau III a été adoptée et tient compte des travaux similaires réalisés par l’UNICEF au Togo (2009), Libéria (2010a), Sénégal (2010b) et en Centrafrique (2010c).

**Tableau III** : Classification pour l’aptitude finale aux forages économiques

Valeur	Classe d’aptitude finale
< 0	Pas favorable
25	Partiellement favorable
50	Favorable
> 75	Très favorable

Toute la méthodologie développée pour la cartographie des zones favorables à l’implantation des forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi est résumée sous la forme d’un organigramme (Figure 21).



**Figure 20 :** Synthèse de la méthodologie pour la réalisation de forages économiques

#### 4.4. Optimisation de la desserte en eau potable dans les zones rurales des départements de Yamoussoukro et de Toumodi

L'accès à l'eau potable demeure un enjeu de taille en Côte d'Ivoire. Dans la plupart des villages, les problèmes demeurent les mêmes : les points d'eau sont non seulement insuffisants, mais aussi inégalement répartis. On assiste à un véritable problème de pérennisation des infrastructures de desserte sans oublier la question de l'adéquation du niveau de service offert à la population par rapport aux besoins (Ministère hydraulique, 2020).

Comment peut-on améliorer l'accès à l'eau potable en tenant compte des normes ? Quel dispositif de gestion peut-on mettre en œuvre pour la pérennisation des ouvrages ?

La réponse va consister à analyser la situation de la desserte en eau potable dans les zones rurales de ces départements et, à proposer un mode de gestion pour pérenniser les ouvrages.

##### 4.4.1 Détermination du poids spatial de chaque forage

Un polygone de Thiessen a été réalisé pour évaluer le poids spatial de chaque forage. En effet, le polygone de Thiessen est une fonction d'interpolation locale utilisant la méthode dite des plus proches voisins. Ces polygones découpent l'espace autour de points de base de telle manière que chacun d'eux comprennent toutes les positions possibles pour lesquelles il est le plus proche point d'échantillonnage (Hounguevou *et al.*, 2014). En construisant un espace

autour de chaque forage, un nouveau maillage se dessine si bien que l'ensemble des points est plus proche du point à partir duquel s'est construit le polygone que d'un autre point. L'utilisation de ces polygones va permettre de mettre en évidence les concentrations de la couverture des forages dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi.

### ✓ Construction des polygones de Thiessen

On définit une variable régionalisée comme étant une fonction numérique prenant ses valeurs dans une région limitée :

–  $z$ , la variable régionalisée ou à estimer.

–  $D$ , le champ de la régionalisation.

$S \in D$ , le vecteur de coordonnées  $(x, y, z)$  qui indique la position d'un site dans le champ  $D$

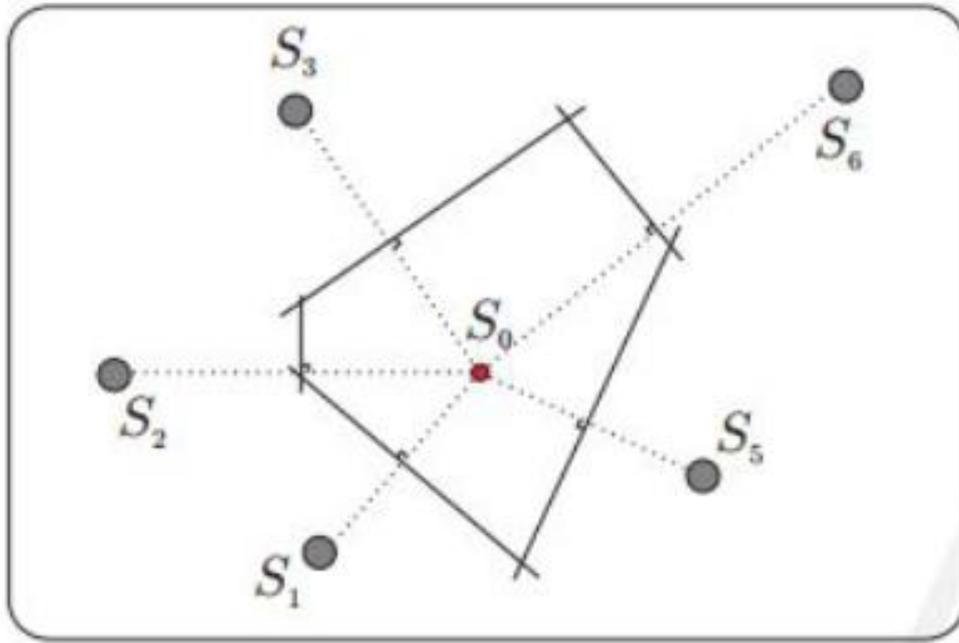
$z(S)$ , la valeur prise par la variable régionalisée  $z$  au site  $S \in D$ .

–  $z(V)$ , la valeur moyenne de  $z$  sur le domaine  $V \subset D$ .

–  $n$ , le nombre de sites où la variable a été mesurée.

–  $z(S_1), \dots, z(S_n)$ , les valeurs prises par  $z$  aux sites d'observation  $S_1 \dots S_n$

Pour tous les points d'observation du champ, on définit un polygone d'influence tel que chaque point du polygone est plus proche du point d'observation que de tout autre site.  $D$  est alors partitionné en un ensemble de polygones de Thiessen (Arnaud et Emery, 2000) (Figure 22).

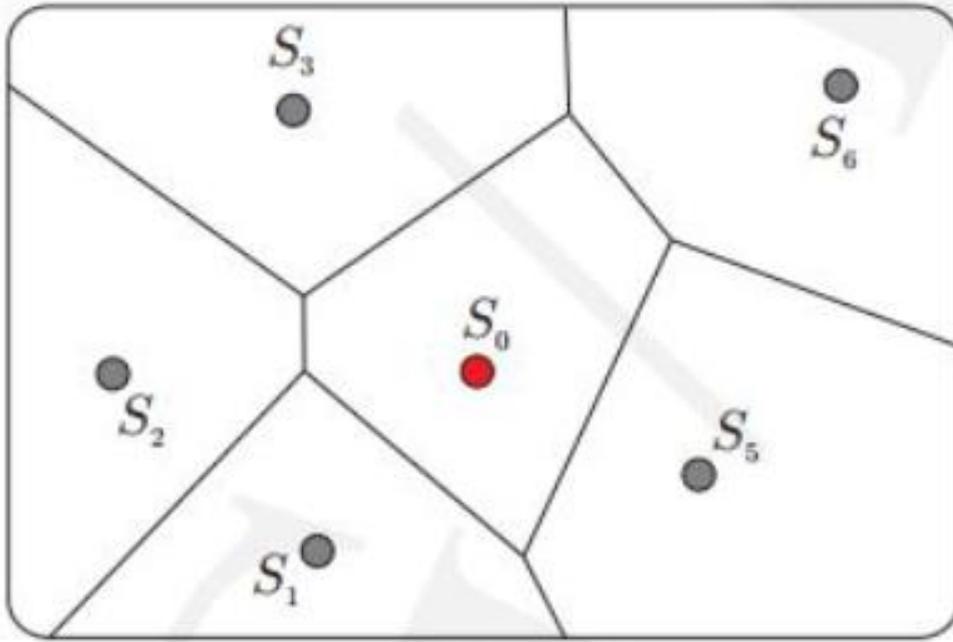


**Figure 21 :** Construction des polygones de Thiessen (Bossier, 2013)

Les observations groupées vont ainsi se voir affecter un polygone d'influence de petite surface, les données isolées un polygone de grande surface (Figure 23). Notons que le découpage de Thiessen est basé essentiellement sur la configuration géométrique et non pas sur les valeurs observées. Les polygones de Thiessen permettent la pondération des observations pour calculer la moyenne de la variable régionalisée sur le champ d'étude (Equation 30).

$$|D| = \sum_{i=1}^n |Pi| \quad (\text{Equation 30})$$

Où  $|Pi|$  est l'aire du polygone  $Pi$  associée au site  $Si$  et  $|D|$  l'aire du champ : Par construction, les zones à observations denses sont les zones à polygones de Thiessen de surface moindre : l'influence de ces zones est donc limitée.



**Figure 22** : Découpage en polygone de Thiessen (Bossier, 2013)

#### 4.4.2 Analyse de l'état du service d'hydraulique

L'exploitation des données de l'Institut National de la Statistique a constitué la base de la recherche. À la Direction régionale de l'hydraulique, nous avons consulté les archives de l'équipement des localités rurales en infrastructures hydrauliques et le rapport d'inventaire dans le cadre du PsGouv 2019-2020. Ces documents ont donné des informations sur l'effectif des ouvrages hydraulique ainsi que leurs natures dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Les entretiens avec le Directeur régional de l'hydraulique et certains gestionnaires des pompes rurales ont permis d'avoir une idée des difficultés de la zone. De plus, les visites de terrain dans soixante localités rurales dans la sous-préfecture ont contribué à apprécier l'état des points de service d'eau. L'INS à travers les Recensements Généraux de la Population et de l'Habitat (2014 et 2021) a permis de faire la projection des effectifs de populations des villages de l'espace d'étude aux horizons 2027 et 2032. Ces données ont concouru à apprécier le niveau d'adéquation des infrastructures d'accès à l'eau potable avec la démographie.

La pression démographique des points de services en eau (PSE) fut appréciée suivant les normes nationales de l'hydraulique rurale. Celles-ci stipulent qu'un point d'eau moderne dessert en moyenne 500 habitants. La typologie des systèmes d'approvisionnement en eau prévoit l'Hydraulique Villageoise pour les localités de moins de 1 000 habitants, l'Hydraulique Villageoise Améliorée pour les villages de 1 000 à 4 000 habitants et l'Hydraulique Urbaine en faveur des villages électrifiés de plus de 4 000 habitants (Koukougnon *et al.*, 2020). Les

informations collectées ont été consolidées dans une matrice d'information où à chaque localité fut affectée la taille de population, le type de système d'approvisionnement en eau, l'effectif des points de service d'eau et leur état.

### 4.4.3 Projection de la population aux horizons 2027 et 2032

Le taux d'accroissement de la population ivoirienne en 2022 est de 2,9 % (INS, 2021). Pour déterminer la population aux différents horizons dans la zone d'étude, nous allons appliquer un modèle de croissance géométrique où le taux de croissance est proportionnel à la population et au temps (Équation 31).

$$P_n = P_0 (1 + \alpha)^n \quad (\text{Equation 31})$$

$P_n$  = Population après  $n$  années,  $P_0$  = Population à l'année de référence,  $\alpha$  = Taux d'accroissement de la population.

### Conclusion partielle

Au terme de cette approche méthodologique, il convient de faire une synthèse de la démarche globale qui a guidé cette étude. Elle a d'abord, consisté à concevoir d'une base de données relationnelle. Ainsi, La Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise ou (MERISE) a servi de base pour la réalisation du modèle conceptuel des données à travers le formalisme Entité-Relation. Ensuite, la méthode d'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et l'approche géostatistique a permis d'analyser la productivité de l'aquifère. Par ailleurs, la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages économiques a été réalisé par la méthode d'analyse multicritères. Enfin, pour l'optimisation de la desserte en eau potable dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, le polygone de Thiessen a permis d'une part, de mettre en évidence le poids spatial de chaque forage, l'état du service d'hydraulique villageoise et d'autres part, Influence de la démographie sur les ouvrages et l'estimation des ouvrages à l'horizon 2032 a été défini.

Les résultats obtenus seront donc analysés, interprétés et discutés dans la troisième partie de ce travail.

## **PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSION**

### CHAPITRE 5 : Base de données spatiales ou Geodatabase

#### 5.1. Modèle Conceptuel des Données (MCD)

Les entités retenues ont permis de réaliser un modèle conceptuel des données (MCD). Il apparaît, du point de vue graphique, comme un ensemble de polygones reliés par des polylignes (Figure 24). Il est constitué d'une série d'entités spatiales (symbolisées par un pictogramme) et non spatiales, et relié les unes aux autres par des relations. Ce modèle propose une façon simple de représenter les données et les relations existantes au sein de celles-ci indépendamment du logiciel ou de la structure de stockage des données.

La proposition de cette structure doit correspondre aux besoins de la réalité, en d'autres termes aux besoins des futurs utilisateurs du système. Il s'agit donc dans le cas présent de proposer une structure d'accueil des données sur toutes les composantes d'un forage dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi.

Les entités du MCD sont regroupées en trois (3) classes :

- les objets cartographiques au nombre de quatre (4) à savoir : l'extrait topographique, le réseau hydrographique, le réseau routier et l'image satellitaire. Ces entités constituent un repère cartographique.
- les entités à référence spatiale (marquées d'un pictogramme) au nombre de quatre (5) à savoir : FORAGE, VILLAGE, SOUS PREFECTURE, GEOPHYSIQUE et DEPARTEMENT. Ces entités sont regroupées selon leur spécificité spatiale :
  - Entités ponctuelles : FORAGE. Elle a une fonction de localisation des éléments qu'il représente.
  - Entités surfaciques : VILLAGE, SOUS-PREFECTURE, GEOPHYSIQUE et DEPARTEMENT. Elles servent à évaluer l'impact des points d'eau sur les populations à grande échelle.
- les entités non spatiales ou descriptives au nombre de neuf (8). Elles n'ont aucune référence spatiale : DONNES HYDRODYNAMIQUES, EQUIPEMENT, ANALYSE CHIMIQUE, COMITE-GESTION, PIEZOMETRIE, ESSAI-POMPAGE, PREVISION, LITHOLOGIE.

Les relations entre les entités sont traduites par des verbes représentés par des figures ovales de couleur verte sur le MCD. Ces relations sont toutes différentes les unes des autres et diffèrent aussi des attributs relatifs des entités. Cela est nécessaire afin d'éviter que le système ne les confonde et qu'il ne puisse réaliser correctement les requêtes.

## RESULTATS ET DISCUSSION

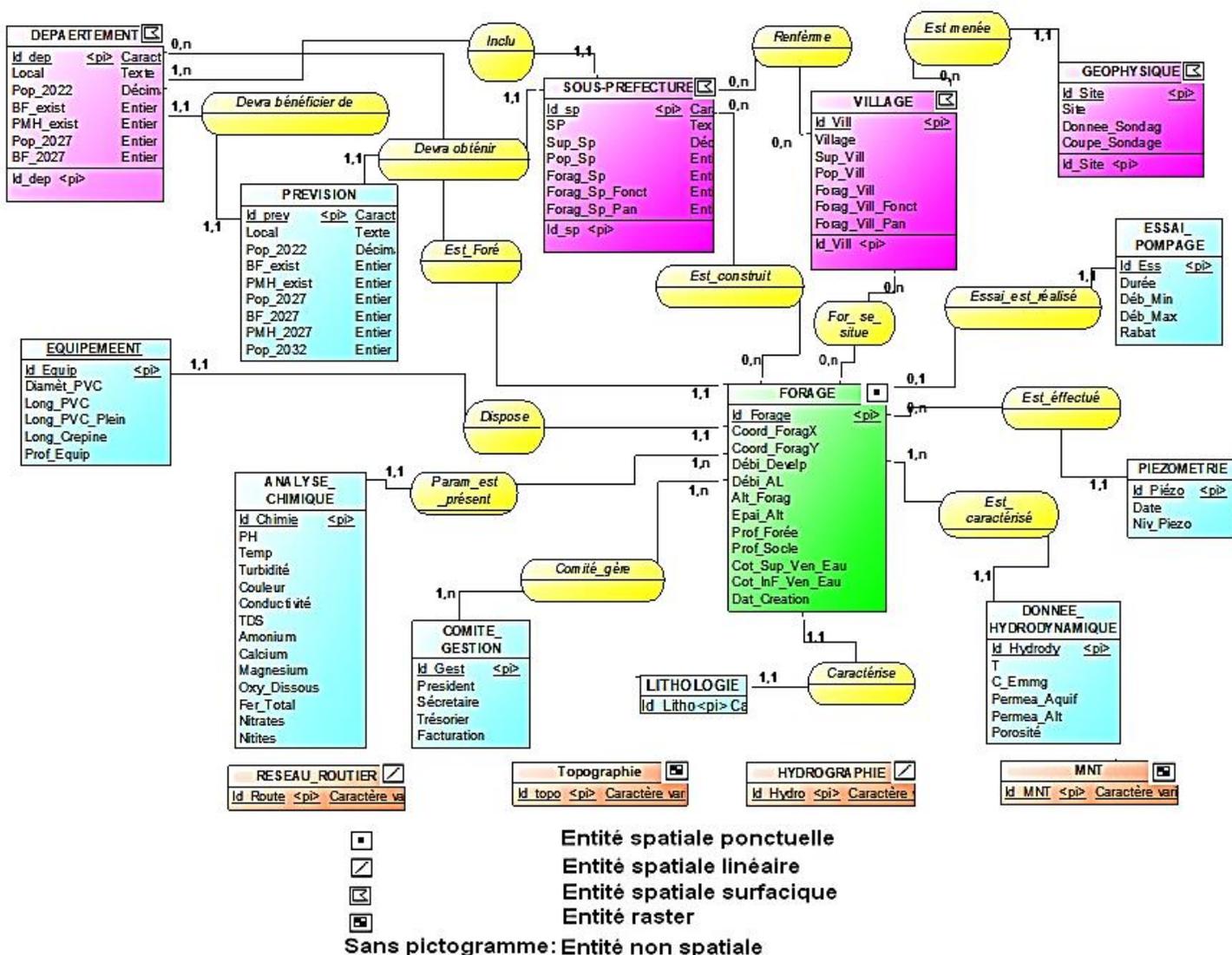


Figure 23 : Modèle Conceptuel de Données

## RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle conceptuel des données (MCD) étant réalisé, l'étape suivante a consisté à analyser la transposition du MCD en modèle logique des données (MLD).

### 5.2. Modèle Logique des Données (MLD)

Ce modèle est un modèle logique des données relationnelles. Dans ce modèle, les noms des tables sont en première position suivis des attributs.

Le MLD présente les tables qui composent la base de données. Le passage du MCD au MLDR est favorisé par les cardinalités. En outre, le MLD a permis de déterminer le nombre de tables finales qui compose la base de données. Il s'agit des tables :

DEPARTEMENT (Id\_dep, Dept, Sup\_Dept, Pop\_dep, Forag\_ Dept, Forag\_Dept\_Fonct, Forag\_ Dept\_Pan, #Id\_Forage) ;

SOUS-PREFECTURE (Id\_Sp, Sp, Sup\_Sp, Pop\_Sp Forag\_Sp, Forag\_Sp\_Fonct, Forag\_Sp\_pan, #Id\_Forage);

GEOPHYSIQUE (id\_Site, site, Donnee\_Sondag, Coupe\_Sondage) ;

VILLAGE (Id\_Vill, Village, Sup\_Vill, Pop\_Vill, Forag\_Vill, Forag\_Vill\_Fonct, Forag\_Vill\_Pan, #Id\_Forage, #id\_Site) ;

EQUIPEMENT (Id\_equip, Diamet\_PVC, Long\_PVC, Long\_PVC\_Plein, Long\_Crépine, Prof\_Equip) ;

FORAGE (Id\_Forage, Coord\_ForagX, Coord\_ForagY, Date\_Creation, Debi\_Develop, Debi\_Alt, Alt\_Forage, Epai\_Alt, Prof\_Forée, Prof\_Socle, Cot\_Sup\_Ven\_Eau, Cot\_Inf\_Ven\_Eau, For\_en\_fonct, For\_en\_panne #Id\_equip, #Id\_Chimie, #Id\_Ess, #Id\_piezo, #Id\_Hydrody, #Id\_Litho, #Id\_Gestion, #Id\_dep, #Id\_Sp, #id\_Site) ;

PARAMETRES CHIMIQUES (Id\_Chimie, PH, Temp, Turbidite, Couleur, Conductivite, TDS, Ammonium, Calcium, Magnésium, Oxygene\_Dissous, FerTotal, Nitrates, Nitrites) ;

COMITE DE GESTION (Id\_Gestion, President, Secretaire, Trésorier, Facturation, Gain...) ;

ESSAI DE POMPAGE (Id\_Ess, Durée, Deb\_Min, Deb\_Max, Rabat, Donnee\_Sondag) ;

PIEZOMETRIE (Id\_piezo, Date, Niv\_piezo, #Id\_Forage) ;

PARAMETRES HYDRODYNAMIQUE (Id\_Hydrody, T, C\_Emmg, Permea\_Aquif, Porosite, Deb\_sp, Permea\_Alt) ;

LITHOLOGIE (Id\_litho, Nom\_Roche, #Id\_Forage).

PREVISION (Id\_Prev, Localité, Pop\_2022, BF\_2022, PMH\_2022, Pop\_2027, BF\_2027, PMH\_2027, Pop\_2032, PMH\_2032, # Id\_SP, #Id\_dep).

Ce sont les clés (primaire et étrangère) qui permettront de faire la jonction entre deux (2) tables et donc d'établir une contrainte d'intégrité référentielle entre les entités. En effet, la contrainte

## RESULTATS ET DISCUSSION

d'intégrité référentielle lie deux colonnes ou deux ensembles de colonnes de deux tables différentes ayant un attribut en commun. Une description détaillée de chaque table du modèle logique des données, est indiquée dans le dictionnaire des données.

### 5.3 Dictionnaire des données du MLDR

Le dictionnaire des données est un complément indispensable au modèle conceptuel et au modèle logique des données. Il contient toute l'information au sujet des entités et des attributs. Il permet d'assurer l'indépendance du système vis-à-vis des différents utilisateurs du SIRS. Ainsi, un nouvel utilisateur peut se faire une idée claire et précise sur les données implantées. Enfin, il dresse un inventaire complet de toutes les entités et de leurs attributs. Cette représentation sous forme de tableau permet une vision claire et synthétique de l'ensemble des données. Le dictionnaire des données regroupe toutes les entités spatiales ponctuelles, surfaciques ainsi que les entités non spatiales. En plus de leur définition, chaque table du MLD, est décrite avec l'ensemble de ces attributs. Ce sont ces tables (Tableaux IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII, IVX, XV, XVI) qui seront intégrées dans le système de gestion de base de données (SGBD) pendant l'implantation du modèle physique des données (MPD).

**Tableau IV :** Table département

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_dep	Identifiant du département	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Dept	Nom du département	Alphanumérique	30	
	Sup_Dep	Superficie de département	Alphanumérique	50	
	Pop_Dep	Population de département	Réel	50	
#	Id_Forage	Identifiant du forage	Alphanumérique		

**Tableau V :** Table sous-préfecture

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_Sp	Identifiant de la sous-préfecture	Alphanumérique	15	Obligatoire
	SP	Nom de la sous-préfecture	Alphanumérique	30	
	Pop_SP	Population de Sous-préfecture	Réel	50	
	Sup_Sp	Superficie de la sous-préfecture	Réel		
#	Id_Forage	Identifiant du forage	Alphanumérie		

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau VI :** Table géophysique

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	id_Site	Identifiant du site de la prospection Géophysique	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Site	Lieu de prospection géophysique	Alphanumérique	30	
	Donnee_Sondag	Résultats du sondage géophysique	Réel		
	Coupe_Sondage	Coupe schématique du sondage géophysique	booléen		

**Tableau VII :** Table Village

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_Vill	Identifiant du village	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Village	Nom du village	Alphanumérique	30	
	Sup_Vill	Superficie du village	Réel		
	Pop_Vill	Population de village	Réel		
#	Id_Forage	Identifiant du forage	Alphanumérique		
#	id_Site	Identifiant du site de la prospection Géophysique	Alphanumérique		

**Tableau VIII :** Table équipement

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id equip	Identifiant de l'équipement du forage	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Diamet_PVC	Diamètre de PVC pour l'équipement	Réel		
	Long_PVC	Longueur totale du PVC utilisé pour l'équipement	Réel		
	Long_PVC_Plein	Longueur totale du PVC plein utilisé	Réel		
	Long_Crépine	Longueur totale de la crépine	Réel		
	Prof_Equip	Profondeur équipée	Réel		

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau IX :** Table forage

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
<b>P</b>	Id_Forage	Identifiant du forage	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Coord_ForagX	Coordonnée X du forage	Réel		
	Coord_ForagY	Coordonnées Y du forage	Réel		
	Date_Creation	Date de création de forage	date	10	JJ/MM/AAAA
	Debi_Develop	Débit de développement du forage	Réel		
	Debi_Alt	Débit Air Lift	Réel		
	Alt_Forage	Altitude de positionnement du forage	Réel		
	Epai_Alt	Côte de l'épaisseur d'altérite	Réel		
	Prof_Forée	Profondeur Forée	Réel		
	Prof_Socle	Profondeur de socle	Réel		
	Cot_Sup_Ven_Eau	Côte supérieure de venue d'eau	Réel		
	Cot_Inf_Ven_Eau	Côte inferieur de venue d'eau	Réel		
	For_en_fonct	Forage fonctionnel	Réel		
	For_en_panne	Forage en panne	Réel		
#	Id_dep	Identifiant du département	Alphanumérique		
#	Id_sp	Identifiant de sous préfecture	Alphanumérique		
#	Id_vill	Identifiant du village	Alphanumérique		
#	Id equip	Identifiant de l'équipement du forage	Alphanumérique		
#	Id_Chimie	Identifiant de l'Analyse Chimique de l'eau	Alphanumérique		
#	Id_Ess	Identifiant de l'essai de pompage du forage	Alphanumérique		
#	Id_piezo	Identifiant de la piézométrie du forage	Alphanumérique		
#	Id_Hydrody	Identifiant des paramètres hydrodynamiques	Alphanumérique		
#	Id_Litho	Identifiant de la roche	Alphanumérique		
#	Id_Gestion	Identifiant du comité de gestion du forage	Alphanumérique		

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau X :** Table paramètres chimiques

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_Chimie	Identifiant de l'Analyse Chimique de l'eau du forage	Alphanumérique		Obligatoire
	pH	Potentiel d'hydronium	Réel		
	Temp	Température	Réel		
	Turbidite	Taux de turbidité	Réel		
	Couleur	Couleur de l'eau	Alphanumérique		
	Conductivite	Conductivité	Réel		
	TDS	Taux de saturation	Réel		
	Ammonium	Taux d'ammonium	Réel		
	Calcium	Taux de calcium	Réel		
	Magnésium	Taux de magnésium	Réel		
	Oxygene_Dissous	Taux d'oxygène dissous	Réel		
	FerTotal	Taux de Fer total	Réel		
	Nitrates	Taux de nitrates	Réel		
	Nitrites	Taux de nitrites	Réel		

**Tableau XI :** Table comité de gestion

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_Gestion	Identifiant du comité de gestion du forage	Alphanumérique	15	Obligatoire
	President	Nom du Président du comité de gestion du forage	Alphanumérique	30	
	Secetaire	Nom du Secrétaire du comité de gestion du forage	Alphanumérique	30	
	Trésorier	Trésorier du comité de gestion du forage	Monétaire	30	
	Facturation	Prix de l'eau dans la localité	Alphanumérique	30	
	Gain	Gain mensuel	Monétaire		CFA

**Tableau XII :** Table essai de pompage

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_ess	Identifiant de l'essai de pompage du forage	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Durée	Durée de l'essai de pompage	Entier		
	Deb_Min	Débit minimum de l'essai de pompage	Réel		
	Deb_Max	Débit maximum de l'essai de pompage	Réel		
	Rabat	Le rabatement	Réel		
	Donnee_Sondag	Données de l'essai de pompage	Réel		

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau XIII :** Table piézométrie

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_piezo	Identifiant de la piézométrie du forage	Alphanumérique		Obligatoire
	Date	Date de la campagne de la piézométrie	date	10	JJ/MM/AAA
	Niv_piezo	Niveau de l'eau dans le forage	Réel		

**Tableau XIV :** Table parametres hydrodynamiques

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
<b>P</b>	Id_Hydrody	Identifiant des paramètres hydrodynamiques du forage	Alphanumérique	15	Obligatoire
	T	Valeur de la transmissivité de l'aquifère	Réel		
	Deb_sp	Débit spécifique	Réel		
	C_Emmg	Coefficient d'emmagasinement de l'aquifère	Réel		
	Permea_Aquif	Perméabilité de l'aquifère	Réel		
	Porosite	Porosité efficace de l'aquifère	Réel		
	Permea_Alt	Perméabilité des altérites	Réel		

**Tableau XV :** Table lithologie

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation
P	Id_Geol	Identifiant de la roche	Alphanumérique	15	Obligatoire
	Nom_Roche	Nom de la roche	Alphanumérique	15	

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau XVI** : Table prévision

Clé	Variable	Désignation	Type	Taille	Observation	
P	Id_Prev	Identifiant de la localité	Alphanumérique	15	Obligatoire	
	Localité	Nom de la localité				
	Pop_2022	Population 2022	date	10		
	BF_2022	Nombre de bonne fontaine en 2022	Réel			
	PMH_2022	Nombre de pompe à motricité humaine 2022	Réel			
	Pop_2027	Population 2027	Réel			
	BF_2027	Nombre de bonne fontaine en 2027	Réel			
	PMH_2027	Nombre de pompe à motricité humaine 2027	Réel			
	Pop_2032	Population 2032	Réel			
	BF_2032	Nombre de bonne fontaine en 2032	Réel			
	PMH_2032	Nombre de pompe à motricité humaine 2032	Réel			
	#	Id_SP	Identifiant de la sous-préfecture	Alphanumérique		
	#	Id_dep	Identifiant du département	Alphanumérique		

NB : au niveau de la clé : P = primaire et # = étrangère.

La phase suivante va permettre de présenter le fonctionnement de ce système d'information à référence spatiale. Cela à travers une analyse et une interprétation des applications fournies par la base de données.

### 5.4 Fonctionnement du prototype

Le S.I.G. présente d'innombrables fonctionnalités. L'une de ces fonctionnalités avancées dans ArcMap est la requête ou encore les interrogations. Dans ce qui suit nous traitons les différents types de requêtes et nous étudions les différentes possibilités d'informations issues de ces interrogations. Le but des requêtes est d'extraire l'information utile aux utilisateurs pouvant leur permettre de prendre des décisions. Par ailleurs, avant de réaliser les requêtes, il va falloir apporter un éclairci sur la notion des relations entre les tables construites dans le SGBD Access.

#### 5.4.1 Relations entre les tables sous ACCESS

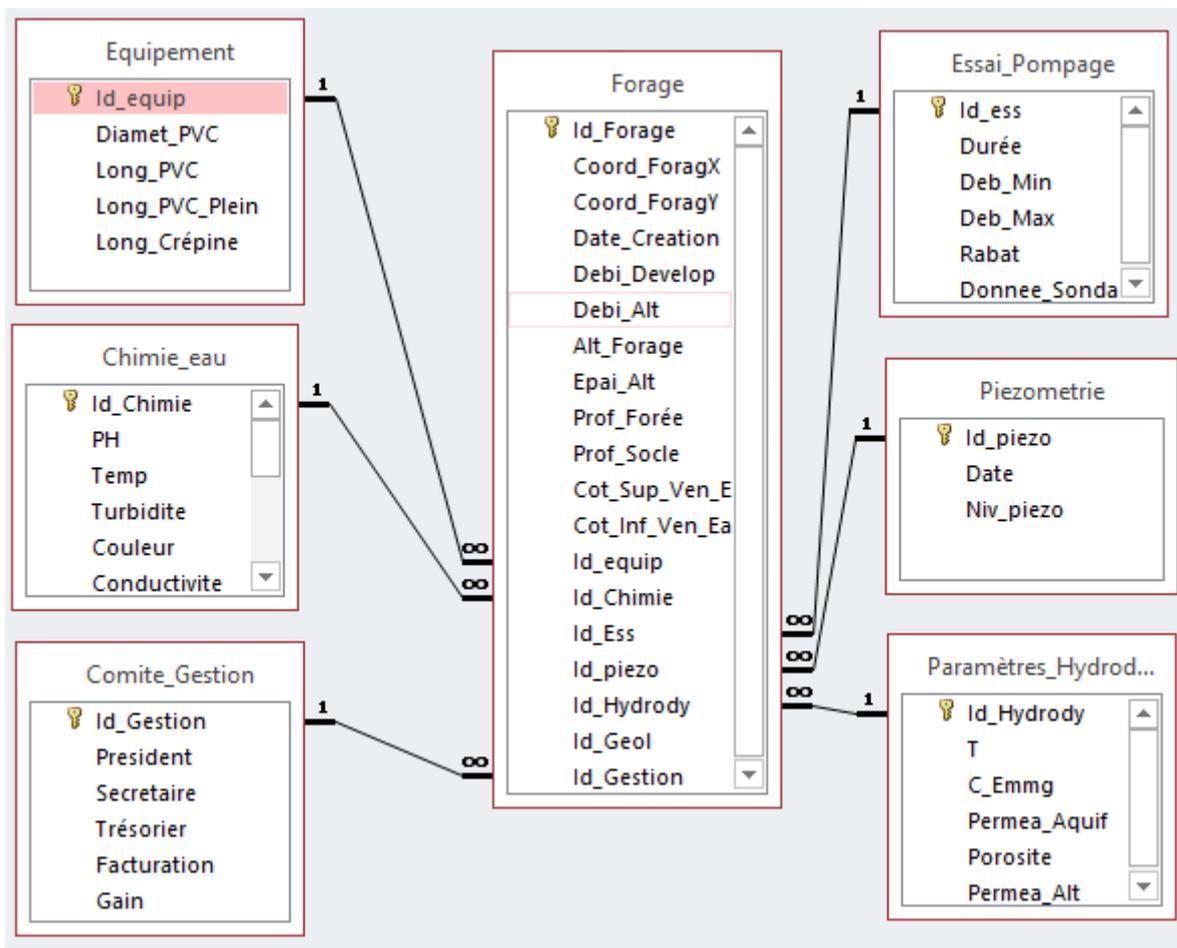
Il faut pouvoir rassembler toutes l'information à travers le système de gestion de base de données « Microsoft Access ». Cela revient à établir des relations entre les différentes tables (excepter les tables à référence spatiale) par l'intermédiaire des clés.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Sous Microsoft Access, toutes les relations établies entre les tables sont de type 1 à plusieurs (1, n). En effet, chaque enregistrement de la table d'origine peut être lié à plusieurs enregistrements de la table associée. L'intégrité référentielle est donc appliquée. Elle concerne l'accord entre l'information distribuée dans deux relations. L'intégrité référentielle de la base de données sera assurée si une valeur de clé primaire existe pour toute valeur de clé étrangère. Le SGBD Access permet une vérification automatique de l'intégrité référentielle.

Elle empêche ainsi d'avoir des incohérences parmi les données à cause d'une suppression accidentelle ou d'une mauvaise saisie.

Un aperçu du modèle relationnel de la base de données est présenté à la Figure 25 :



**Figure 24 :** Exemple de relation (1 à plusieurs) entre certaines tables de la base de données réalisé sous ACCESS

L'exemple de la figure 25 montre que la table FORAGE est liée aux tables ESSAI POMPAGE, PARAMETRE HYDRODYNAMIQUE, CHIMIE DE L'EAU, PIEZOMETRIE, GEOLOGIE, EQUIPEMENT et COMITE DE GESTION par le moyen de l'attribut « Id\_Forage ».

## RESULTATS ET DISCUSSION

La base de données transposée sous MS Access permet de fournir un moyen d'accès convivial et interactif aux informations sans connaissances préalables de Microsoft Access (figure 26).



**Figure 25** : Interface de la base de données relationnelle sous ACCESS

Cette application permet la gestion et le suivi des forages réalisés pour l’approvisionnement en eau potable des populations rurales des départements de Yamoussoukro et de Toumodi. Elle est constituée de deux modules (Donnée hydrogéologiques et données de populations) incluant plusieurs paramètres. Une série d’interrogations peuvent être effectuées au niveau de chaque module selon l’objectif souhaité.

Pour le module « Données hydrogéologiques » par exemple, il permet d’avoir des informations sur les paramètres hydrodynamiques, la piézométrie, la nature de la roche, le débit de développement, la profondeur totale...

Quant au module « Données population », des requêtes peuvent aboutir à la connaissance de la taille de la population, les besoins de la population en terme d’ouvrages hydrauliques.

Ce faisant, les modifications apportées à la base de données entre deux sessions (par exemple ajout de nouveaux inventaires), sont automatiquement prises en compte au niveau des tables et des thèmes auxquels elles sont liées.

# RESULTATS ET DISCUSSION

## 5.4.2 Exemple de requêtes

Quelles sont les localités dont les débits sont supérieurs à 5 m<sup>3</sup>/h?

La résultat de cette requete peut être visualisé sur la figure 27.

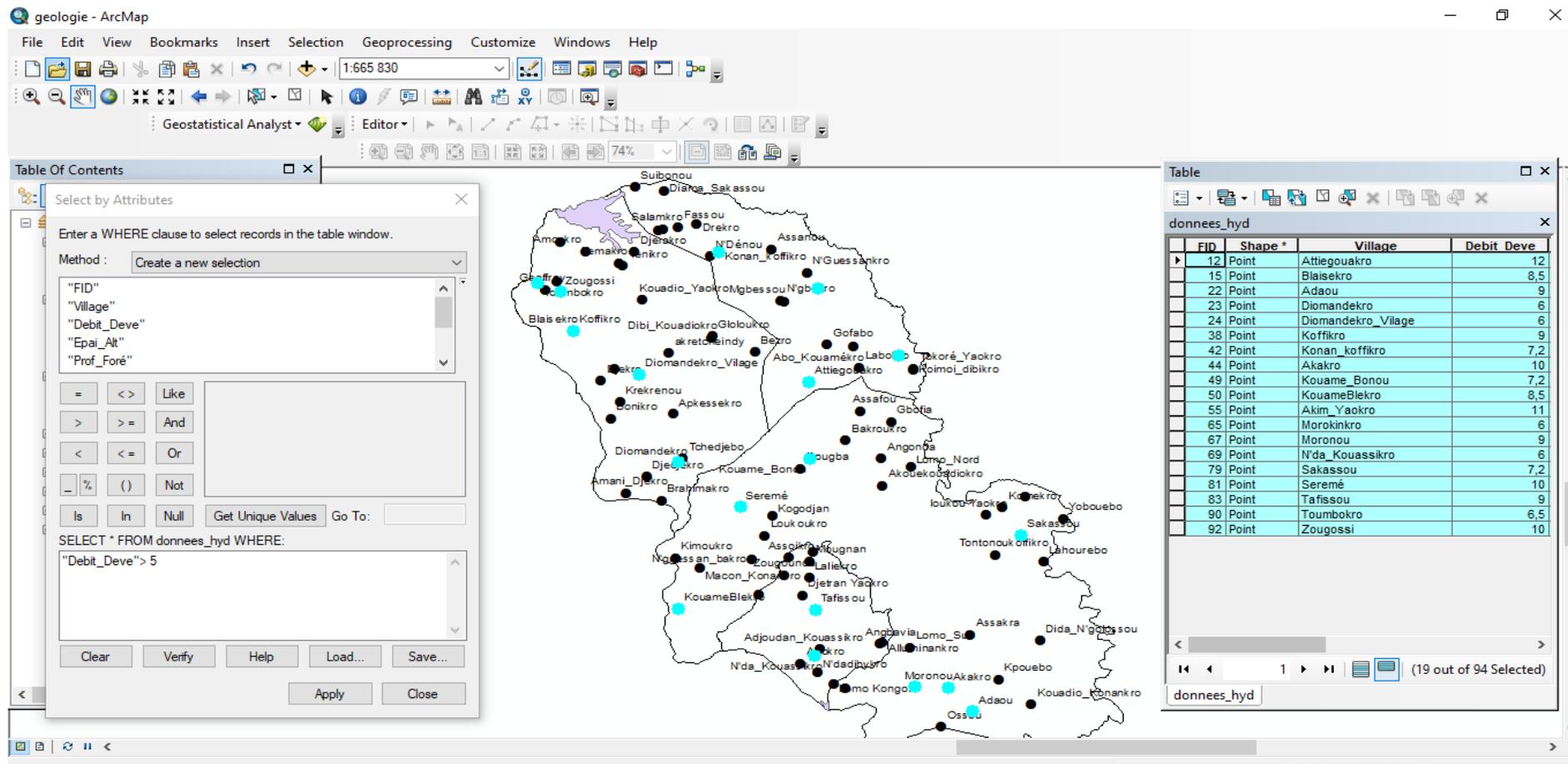


Figure 26 : Exemple de requête sur le logiciel ArcGIS

## RESULTATS ET DISCUSSION

La reponse à cette requete indique que 19 localités ont des forages ayant des débit d'exploitation supérieur à 5m<sup>3</sup>/h. Il s'agit des localités de Attiegouakro, Blaisekro, Adaou, Diomandekro, Diomandekro village, Koffikro, Konan\_Koffikro, Akaro, Kouamebonou, Kouameblekro, Akim\_Yaokro, Morokinkro, Moronou, N'dakouassikro, Sakassou, Sérémé, Taffissou, Toumbokro, Zougossi.

### **Discussion**

L'archivage et la mise à jour de ces informations au sein d'un même système informatisé, permettent un accès plus facile et plus rapide à ces informations et assurer leur sécurité. L'application combinant le Système d'Information Géographique (SIG) ArcGIS couplé à la base de données Access, permet la consultation, l'analyse et l'optimisation de la planification. La démarche adoptée pour la conception de cet outil repose sur la méthode MERISE. Le choix de l'outil de modélisation conceptuelle fut orienté vers Sybase Power AMC. En effet, le choix d'un outil de modélisation est fonction des besoins spécifiques de l'organisation et des moyens qu'elle peut et veut mettre en œuvre (Pouliot *et al.*, 1997). La méthode MERISE ayant prouvé son efficacité dans la gestion des entreprises depuis plusieurs années, a été utilisée. L'élément le plus important de MERISE est le MCD. Il permet d'établir une représentation claire du Système d'Information et définit les liens entre des données (Rochefeld & Morejon, 1989). Cette méthode est tout aussi bien adaptée à la conception d'un système d'information destiné à la gestion du territoire. Il est important de souligner que le modèle conceptuel de données (MCD) n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité qui est établie en fonction des informations pertinentes disponibles et des traitements (requêtes) qui vont être appliqués. Cette représentation n'est donc pas unique et peut varier selon le concepteur et selon le besoin des utilisateurs. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une simplification de la réalité due à la modélisation peut avoir un effet réducteur sur la réalité. Le modèle conceptuel de données est orienté principalement sur le formalisme entité-relation. Ce formalisme (Entité-relation) a eu du succès dans différents domaines. Il a ainsi été appliqué avec succès dans la mise en place d'un SIRS relatif à la surveillance de l'herbier de Posidonies en Méditerranée, et pour le suivi d'exécution des travaux d'une autoroute (Debard, 2005). Il en est de même pour Konan-Waidhet (2007) qui a présenté une application Access couplé à un SIG fonctionnant sous MapInfo dans la gestion intégrée des ressources du territoire de la région de Denguélé au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Cela prouve que la démarche adoptée pour la conception de ce SIRS peut s'appliquer à des problématiques très diversifiées. En outre, il faut noter que le choix du modèle relationnel, présente un certain nombre d'avantage, notamment dans une plus grande

## RESULTATS ET DISCUSSION

souplesse de la base de données. Cela permet des évolutions faciles et une utilisation plus aisée pour des non informaticiens, du fait de sa présentation en table et de la souplesse des langages de manipulation (le langage SQL). Avec un tel modèle, les données sont organisées de manière à représenter le mieux possible le domaine qui leur correspond (spatial et non spatial). Par ailleurs, les avantages de ce type de modèle sont fonction de la pertinence du modèle conceptuel des données dont l'élaboration est un préalable à la mise en place d'un modèle logique de données relationnelles. L'implantation du prototype permet de voir, si la structure de la base de données permet d'extraire les informations nécessaires à la réalisation des traitements requis dans le cadre de la problématique énoncée au début de cette étude. Le prototype constitue donc un moyen de dialogue pour continuer la réflexion et aboutir à la réalisation d'une interface graphique. L'outil de prototypage, ArcGIS, permet d'apprécier ses potentialités dans la mise en œuvre d'un SIRS. Ce logiciel a permis de réaliser cette base de données et de visualiser les résultats avec satisfaction.

Cette application offre à des non-spécialistes en SIG d'accéder facilement aux éléments de la base de données d'une manière graphique intuitive et interactive à l'écran. Utilisée conjointement avec d'autres méthodes de prévision et de statistique, cet outil peut contribuer à la prise de décision pour la gestion et la protection des ressources en eau souterraines.

### **Conclusion partielle**

Cette partie a permis de mettre en place une géodatabase dont la conception s'appuie sur le lien SGBG- SIG. Le modèle conceptuel réalisé est constitué de :

- ✓ quatre (4) objets cartographiques : le réseau routier, le réseau hydrographique, l'extrait topographique et l'image satellitaire ;
- ✓ cinq (5) entités à référence spatiale : le forage, le village, la Sous-préfecture et le département ;
- ✓ huit (8) entités descriptives : les données de chimie, les données hydrodynamiques, les données piézométriques, les données d'essai de pompage, les données de géologie, les données de prévision, l'équipement, le comité de gestion, les données de géophysique.

La traduction du MCD en MLDR a permis de mettre au point un prototype sous *ACCESS*. Ce prototype est constitué du module « données hydrogéologiques » et du module « population ». L'exploitation de cette base donnée a permis de faire des analyses statistiques et des modélisations spatiales.

**CHAPITRE 6 : Paramètres de Productivité des forages**

**6.1 Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle**

Les principales statistiques des paramètres de productivité sont présentées dans le tableau XVII.

**Tableau XVII :** Statistique des paramètres de forages

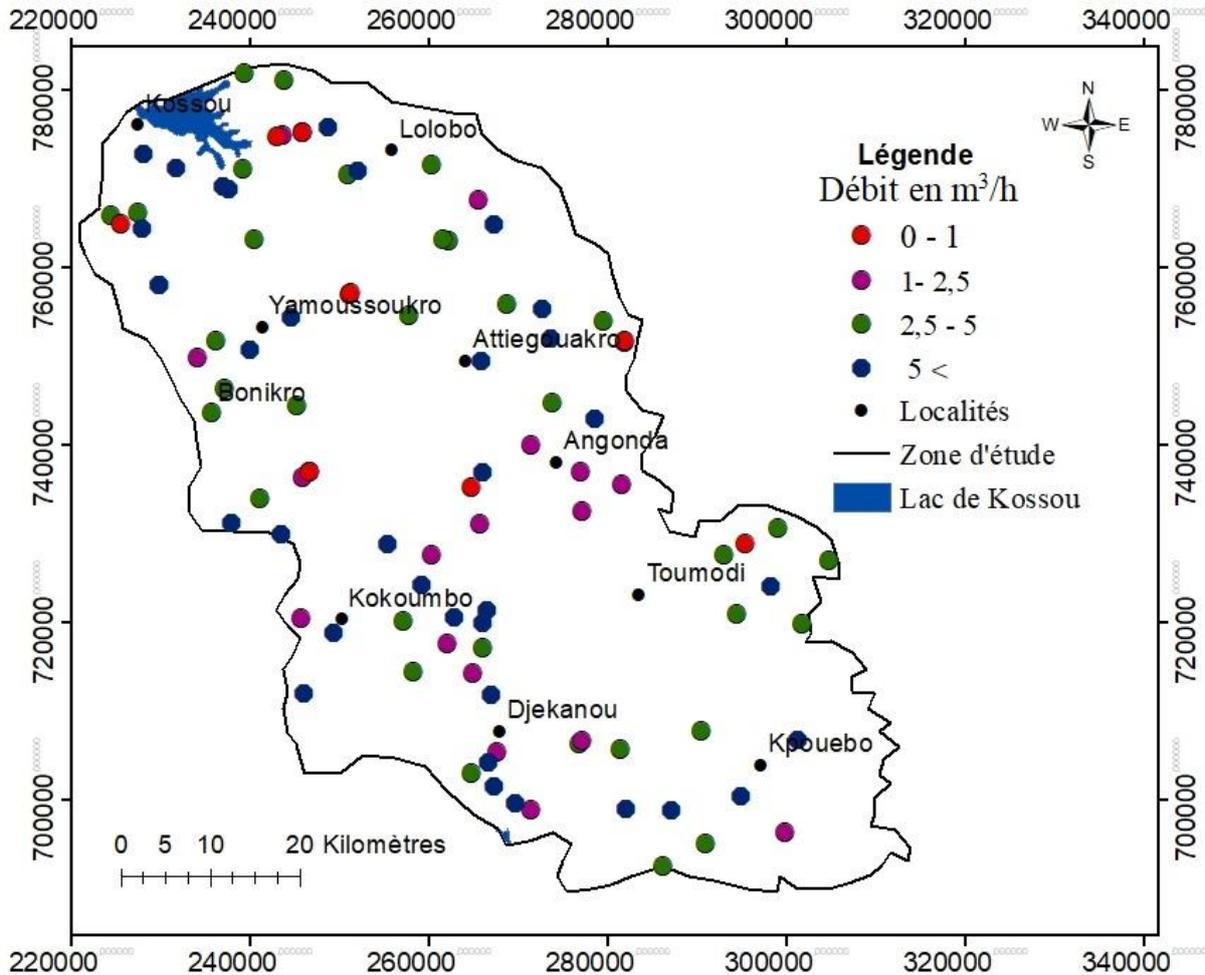
	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	CV (%)
EA (m)	100	2,4	55,08	15,74	5,61	35,6
Pt (m)	100	50,27	105,35	73,14	9,68	33,23
Q <sub>moy</sub> (m <sup>3</sup> /h)	100	0,51	11	5,8	3,4	58,62
NS (m)	100	0,62	64	13,74	7,04	51,23
T (m <sup>2</sup> /s)	60	3,01.10 <sup>-6</sup>	6,69.10 <sup>-4</sup>	8,38.10 <sup>-5</sup>	1,35.10 <sup>-5</sup>	26,11
Q <sub>sp</sub> (m <sup>3</sup> /h/m)	60	0,06	0,27	0,22	0,17	77,27
AE1	60	15,5	77	32,97	13,3	28,5
S'	60	2,9.10 <sup>-6</sup>	4,6.10 <sup>-1</sup>	9,0.10 <sup>-3</sup>	1,5.10 <sup>-3</sup>	27

EA : Epaisseur d'altération, Pt : Profondeur totale, Q<sub>moy</sub>: NS : Niveau statique, T : Transmissivité, Q<sub>sp</sub> : Débit spécifique, S' : Coefficient d'emmengasinement.

L'analyse de ce tableau montre que l'épaisseur d'altération (EA) varie de 2,4 à 55,08 m avec une moyenne de 15,74 m et un écart-type de 5,61 m. La profondeur totale de forage (Pt), quant à elle, varie de 50,27 à 105,35 m avec une moyenne de 73,14 m et un écart-type de 9,68. On dénombre souvent jusqu'à trois arrivées d'eau. Quant au débit moyens des forages, il varie entre 0,51 et 11 m<sup>3</sup>/h avec une moyenne de 5,8 m<sup>3</sup>/h. Par ailleurs, les niveaux statiques oscillent entre 0,62 et 64 m, avec une moyenne de 13,74 m. La transmissivité (T) calculée à partir de la méthode de Cooper-Jacob en remontée varie de 3,01.10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> /s à 6,69.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> /s avec une moyenne de 8,38.10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup> /s et un écart-type de 1,35.10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s. Le débit spécifique (Q<sub>sp</sub>) calculé varie de 0,06 à 0,27 m<sup>3</sup> /h/m avec une moy-enne de 0,22 m<sup>3</sup> /h/m et un écart-type de 0,17. Les données de coefficient d'emmagasinement (S) de forage sont comprises entre 2,9.10<sup>-6</sup> et 4,66.10<sup>-1</sup>. La moyenne est de 9.10<sup>-6</sup> tandis que l'écart type est de 1, 5.10<sup>-6</sup>. Dans ces départements, on dénombre un à trois arrivées d'eau (AE) qui correspondent aux fractures hydrauliquement actives. Ce sont les premières arrivées d'eau qui sont les plus productives. Elles ont une profondeur moyenne de 32,97 m et varient de 15,5 m le minimum à 77 m le maximum. Les valeurs du coefficient de variation (CV) des différents paramètres varient de 26,11% (Transmissivité des aquifères) à 77, 27% (débit spécifique). Les coefficients de variation étant supérieur à 25%, cela indique que le milieu étudié est hétérogène.

**6.1.1 Répartition spatiale des débits d'exploitation par interpolation**

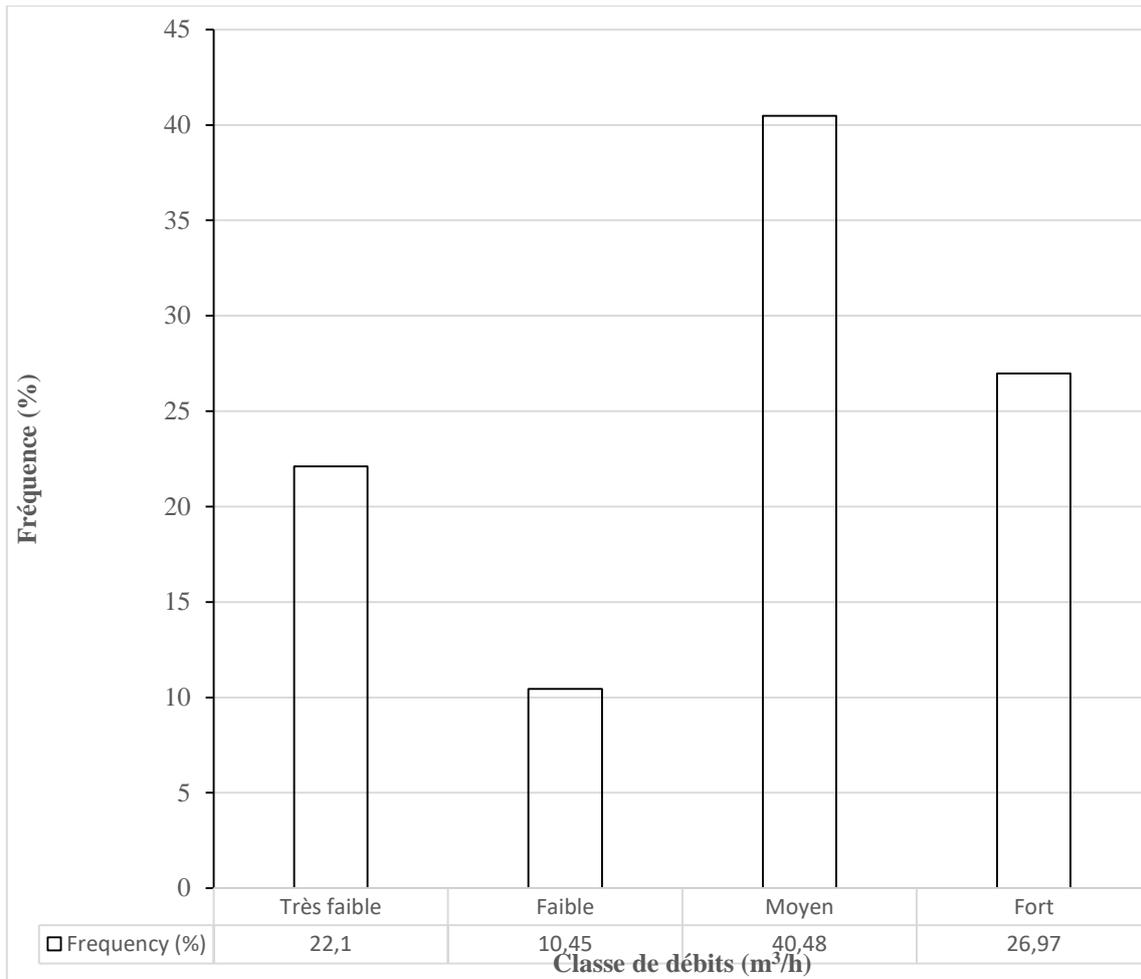
Le résultat obtenu à partir de l'analyse spatiale de la productivité des forages est présenté à la Figure 28. Cette carte indique que 9,37% des débits sont compris entre 0 et 1 m<sup>3</sup>/h et 34,37% pour le débit compris entre 1 et 2,5 m<sup>3</sup>/h. Quant aux débits supérieurs a 2,5 m<sup>3</sup>/h, elles occupent 56,26% de la superficie étudiée.



**Figure 27 :** Carte de repartition spatiale des débits.

Les résultats de la classification des débits (Figure 29) indiquent que 10,45 % des forages se trouvent dans la classe des débits très faibles, 22,1 % dans la classe des débits faibles, 40,48% dans la classe des débits moyens et 26,97% dans la classe des débits forts. Cette classification montre que dans l'ensemble, les forages de ces deux départements ont des débits classés dans la catégorie des débits moyens.

## RESULTATS ET DISCUSSION



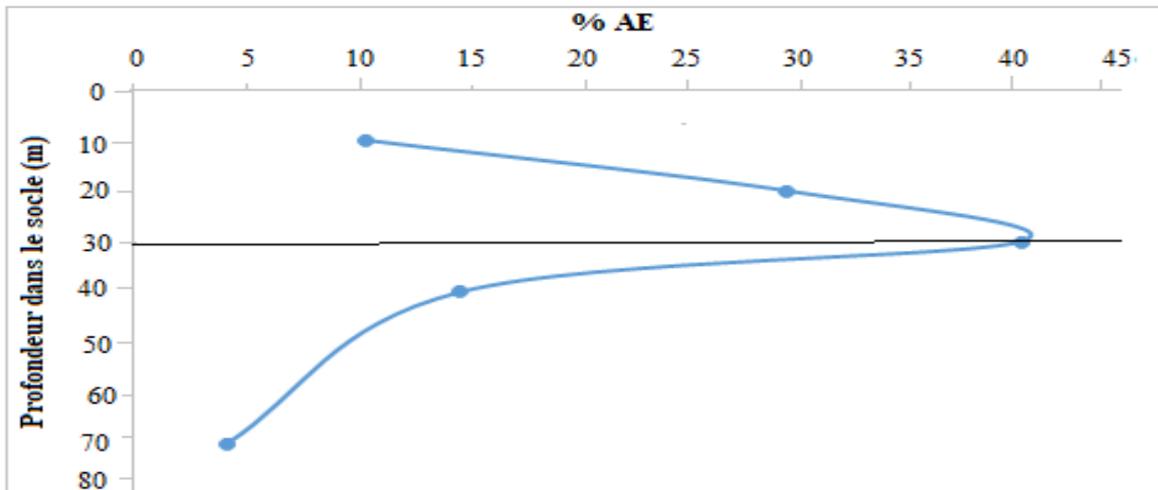
**Figure 28 :** Distribution des débits en fonction des classes

Le socle des départements de Yamoussoukro et Toumodi présente ainsi une productivité relativement modeste pour toutes les lithologies présentes dans ces départements, ce qui est néanmoins caractéristique des aquifères de socle.

### 6.1.2 Analyse des arrivées d'eau (AE) dans le socle

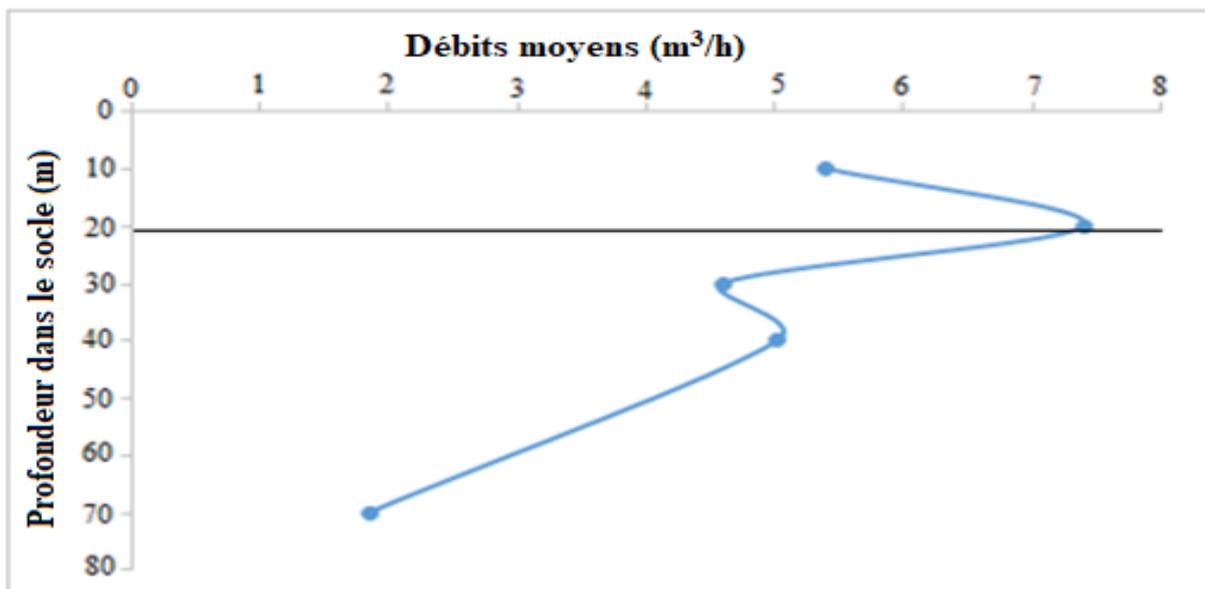
Dans cette étude, seules les arrivées d'eau (AE) enregistrées dans le socle ont été prises en compte. Sur un total de 53 forages où la profondeur des AE a été déterminée, 39 possèdent au plus une seule AE. Seulement 11 forages ont enregistré une deuxième AE et 3 forages, une troisième AE. Le diagramme de la (Figure 30) qui présente la fréquence des AE en fonction des classes de profondeur (pas de 10 m), permet de mieux apprécier la distribution des AE dans le socle. Environ 80,83% des AE se situent au niveau des 30 premiers mètres dans le socle, avec une prédominance entre 30 et 40 m de profondeur dans le socle (40,42% des AE), suivie d'une baisse régulière de la fréquence qui atteint 14,89% aux environs de 40 mètres. Au-delà de cette profondeur, les venues d'eau deviennent très rares.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 29** : Relation entre AE et profondeur des forages dans le socle

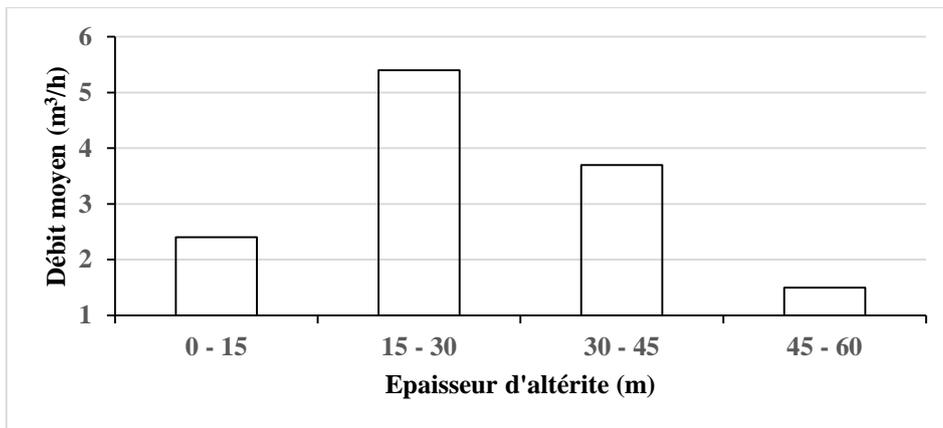
Pour appréhender le comportement de ces arrivées d'eau avec la profondeur, le graphe présentant les débits moyens des AE en fonction des classes de profondeur a été construit (Figure 31). On constate sur ce graphe que le débit moyen des AE augmente avec la profondeur et atteint son maximum ( $7,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ) à environ 20 m dans le socle. Au-delà de cette profondeur, le débit moyen des AE décroît rapidement pour atteindre son plus bas niveau ( $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ) à environ 70 m dans le socle. Les meilleurs débits dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi se situent au niveau des 20 premiers mètres dans le socle. Cette zone correspond à la zone de nombreuses fractures ouvertes et productives. Aux plus grandes profondeurs, les fractures ont tendance à se refermer vers le bas. Toutefois, de rares méga fractures beaucoup plus profondes peuvent être rencontrées et fournir de gros débits.



**Figure 30** : Productivité dans le socle

### 6.1.3 Productivité des forages selon l'épaisseur d'altérite

L'étude du débit moyen en fonction des classes d'épaisseurs d'altérites est effectuée pour déterminer une probable existence de relation entre ces deux paramètres (figure 32). Les moyennes de débits évalués par classe donnent des débits importants allant jusqu'à 45 m d'épaisseur d'altération avec comme classe modale l'intervalle compris entre 15 et 30 m. En outre, ces débits sont plus ou moins supérieurs à 2,5 m<sup>3</sup>/h (classe de débit moyen et fort). Toutefois, au-delà de 45 m d'épaisseur d'altérite les débits moyens ont tendance à baisser pour atteindre 1,5 m<sup>3</sup>/h (classe de débit faible).

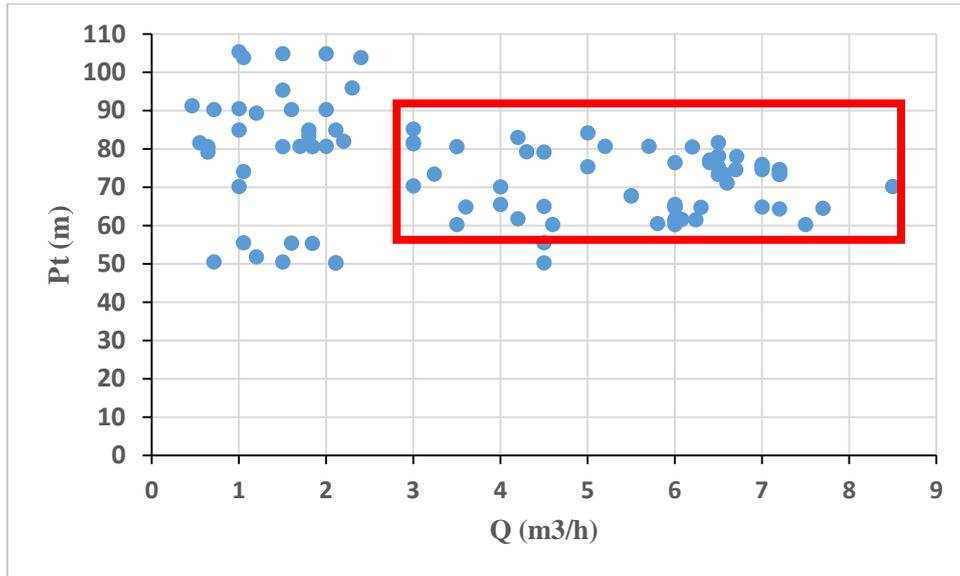


**Figure 31** : Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altération

### 6.1.4 Productivité des forages selon la profondeur

Dans l'optique de pouvoir déterminer la profondeur optimale d'obtention des forages productifs dans les départements, un histogramme de répartition des débits en fonction de la profondeur totale de l'ouvrage a été réalisé (Figure 33). Pour ce faire, les débits ont été répartis par classe de profondeur et un débit moyen a été calculé par classe.

## RESULTATS ET DISCUSSION



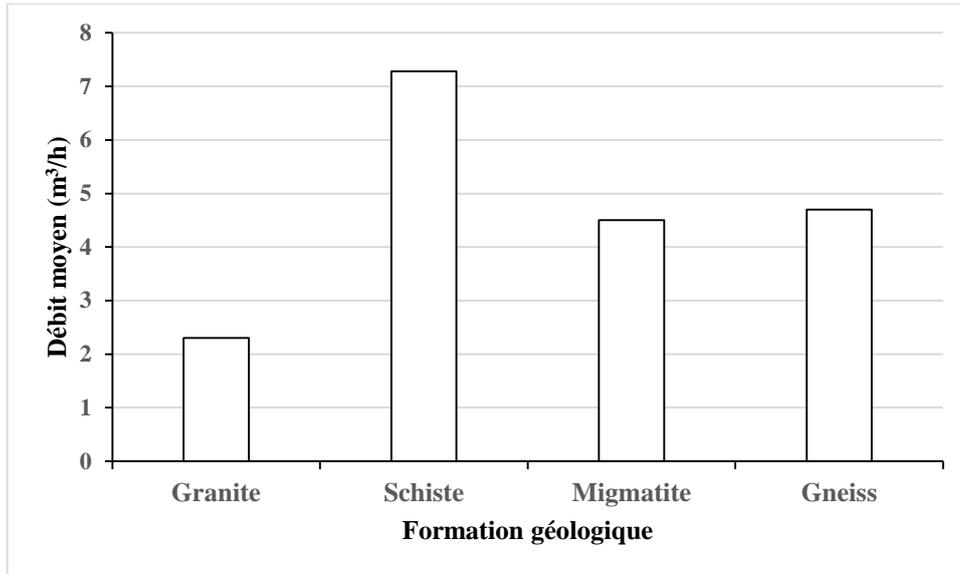
**Figure 32 :** Evolution des débits en fonction des profondeurs totales des forages

A l'analyse, la tranche de profondeur optimale à proposer pour réaliser des forages est comprise entre 60 et 70 m, 70 et 80 m, 80 et 90 m. En effet, dans ces classes, les débits variant de 6 à 7 m<sup>3</sup>/h ont la plus grande fréquence. La mise en évidence de la relation entre les profondeurs des forages et les débits montre également que les bons débits sont obtenus entre 60 m et 90 m de profondeur avec un maximum entre 70 et 80 m.

### 6.1.5 Productivité des forages selon la lithologie

La figure 34 présente la productivité des forages en fonction des différentes formations géologiques du substratum sous-jacent. Il ressort de l'analyse que les débits importants moyen indiquent 2,78 m<sup>3</sup>/h pour le Granite, 7,28 m<sup>3</sup>/h dans les formations schisteuses, 4,54 m<sup>3</sup>/h dans les Migmatites, et 4,69 m<sup>3</sup>/h dans les Gneiss. La productivité dans l'ordre croissant donne ainsi : Granites < Migmatites < Gneiss < Schistes.

## RESULTATS ET DISCUSSION



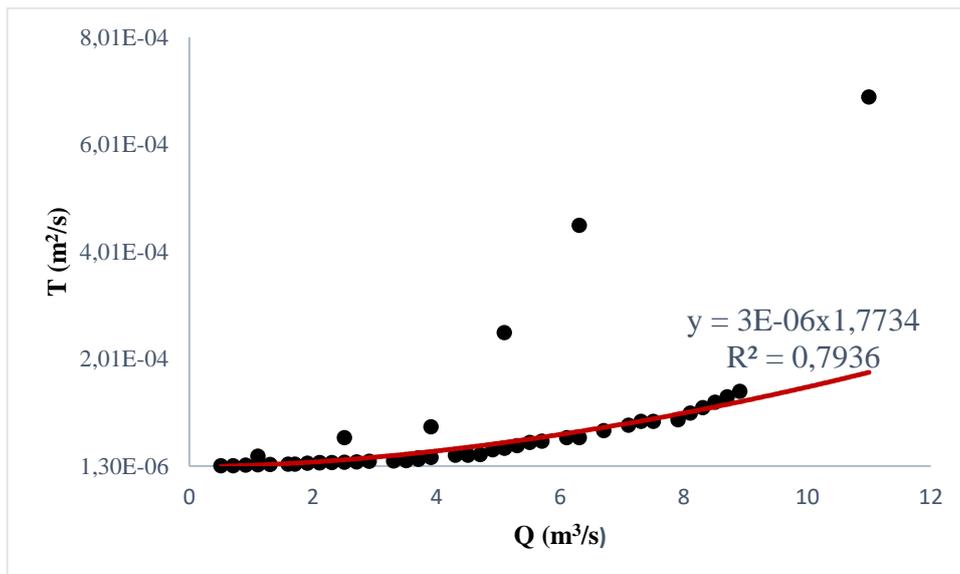
**Figure 33 :** Evolution des débits en fonction de la lithologie

### 6.1.6 Productivité et transmissivité

L'étude de la relation entre la transmissivité et le débit de forage a été réalisée par la méthode de régression de type puissance (Figure 35). Elle a permis de déterminer l'équation de la courbe et le coefficient de corrélation entre ces deux variables (0,7936). Ce coefficient traduit l'influence de la transmissivité sur la productivité de l'aquifère. La relation qui lie ces deux variables (transmissivité et débit) est exprimée par l'équation 32.

$$T = 3.10^{-6} \times Q^{1,7734} \quad (\text{Equation 32})$$

Avec : T en m<sup>2</sup>/s et Q en m<sup>3</sup> /h.



**Figure 34 :** Relation entre transmissivité et débit de forages

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les forages ayant une transmissivité supérieure à  $10^{-5}$  représentent 65,5% de l'ensemble des ouvrages étudiés. Ainsi, 65,5 % des forages ont une transmissivité moyenne à forte. Cela signifie que les aquifères des départements de Yamoussoukro et Toumodi, en général, ont une grande fonction conduite. Cependant, la transmissivité des aquifères de la région varie en fonction de la nature pétrographique des roches. Les transmissivités moyennes sont majoritaires dans les classes de moyenne à forte au niveau des terrains granitiques (60,2 %), et dans les schistes (52,2%). Les transmissivités sont plus fortes dans les terrains granitiques et moins fortes dans les terrains schisteux (Tableau XVIII).

**Tableau XVIII : Classe de transmissivité des différentes formations du socle**

Classe	$<10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-4}$	$>10^{-4}$
Fréquence	%	%	%
Granites	21,1	47,5	31,4
Schistes	33	37,5	30,5

### 6.1.7 Analyse de corrélation entre différents paramètres

La méthode de l'analyse en composantes principales normées (ACPN) a permis de mettre en évidence la productivité de l'aquifère. La matrice de corrélation multiple des paramètres pris en considération est présentée dans le tableau XVIII.

**Tableau XIX : Matrice de corrélation**

Variables	AE <sub>1</sub>	EA	ES	P <sub>t</sub>	NS	Q <sub>moy</sub>	Q <sub>sp</sub>	T
AE <sub>1</sub>	1							
EA	0,05	1						
ES	0,59	0,05	1					
P <sub>t</sub>	0,55	-0,07	0,54	1				
NS	-0,13	-0,26	-0,13	-0,20	1			
Q <sub>moy</sub>	0,02	0,77	0,02	0,04	-0,37	1		
Q <sub>sp</sub>	0,09	0,75	0,09	0,06	-0,36	0,95	1	
T	0,09	0,26	0,09	0,14	-0,27	0,52	0,66	1

## RESULTATS ET DISCUSSION

EA : Epaisseur d'altérite ; NS : Niveau statique ;  $P_t$  : Profondeur totale ;  $Q_{moy}$  : Débit moyen ;  $Q_{sp}$  : Débit spécifique ; T : Transmissivité, AE1 : Première arrivée d'eau, ES : Epaisseur de socle.

L'analyse de ce tableau montre plusieurs niveaux de corrélation entre les différentes variables. On observe une corrélation significative entre le débit moyen, l'épaisseur d'altération ( $r = 0,77$ ), entre le débit spécifique et l'épaisseur d'altération ( $0,75$ ), et entre le débit moyen et le débit spécifique ( $0,95$ ). Des corrélations moyennes sont aussi observées, entre le débit moyen et la transmissivité ( $r = 0,52$ ) et le débit spécifique et la transmissivité ( $r = 0,66$ ) ; entre l'épaisseur de socle et la première arrivée d'eau ( $r = 0,59$ ), entre la profondeur totale et la première arrivée d'eau ( $r = 0,55$ ). En dehors de ces liens, il n'existe aucun autre lien de dépendance entre ces deux variables et les autres paramètres.

En ce qui concerne les plans factoriels, les facteurs F1, F2 et F3 rassemblent à eux seuls 85,3 % des variables exprimées (Figure 35). Les valeurs de ces différents facteurs utilisés, sont indiquées dans le tableau XX. Ils peuvent donc permettre d'interpréter les résultats obtenus.

**Tableau XX** : Pourcentages et écart types des facteurs utilisés

N°	Total Variance	%	% Cumulé
1	3,206774	53,44623	53,4462
2	1,160345	19,33908	72,7853
3	0,751255	12,52092	85,3062

Les valeurs ayant servi à la réalisation des graphes de la figure 37 sont consignées dans le tableau XXI.

**Tableau XXI** : Tableau des coordonnées des variables

Variables	Fact.1	Fact.2	Fact.3
AE1	-0,110542	-0,218031	-0,008031
EA	-0,801515	0,336346	0,204746
ES	0,103740	0,258531	-0,233839
Pt	-0,106482	-0,875113	-0,133731
NS	0,503740	0,458531	-0,633839
$Q_{moy}$	-0,947312	0,126963	0,008057
$Q_{sp}$	-0,968532	0,085707	-0,124048
T	-0,681029	-0,218353	-0,523685

EA : Epaisseur d'altération, Pt : Profondeur totale, NS : Niveau statistique, Qmoy : Débit moyen, Qsp : Débit spécifique, T : Transmissivité, AE1 : Première arrivée d'eau, ES : Epaisseur de socle.

### 6.1.8 Analyse dans l'espace des variables

L'analyse du plan factoriel F1-F2 (Figure 36) montre que le facteur 1 est déterminé par EA, Qsp, Qmoy et T. Ce facteur exprime la productivité des ouvrages. Ces résultats confirment ceux obtenus au niveau de la matrice de corrélation. Quant au facteur F1-F3, il est déterminé par la Pt, les AE1 et ES. Ce facteur exprime la variation du niveau d'eau dans les aquifères. Ces résultats montrent qu'il existe une relation entre le niveau d'eau dans les aquifères et les paramètres que sont la profondeur de l'ouvrage et l'épaisseur de socle.

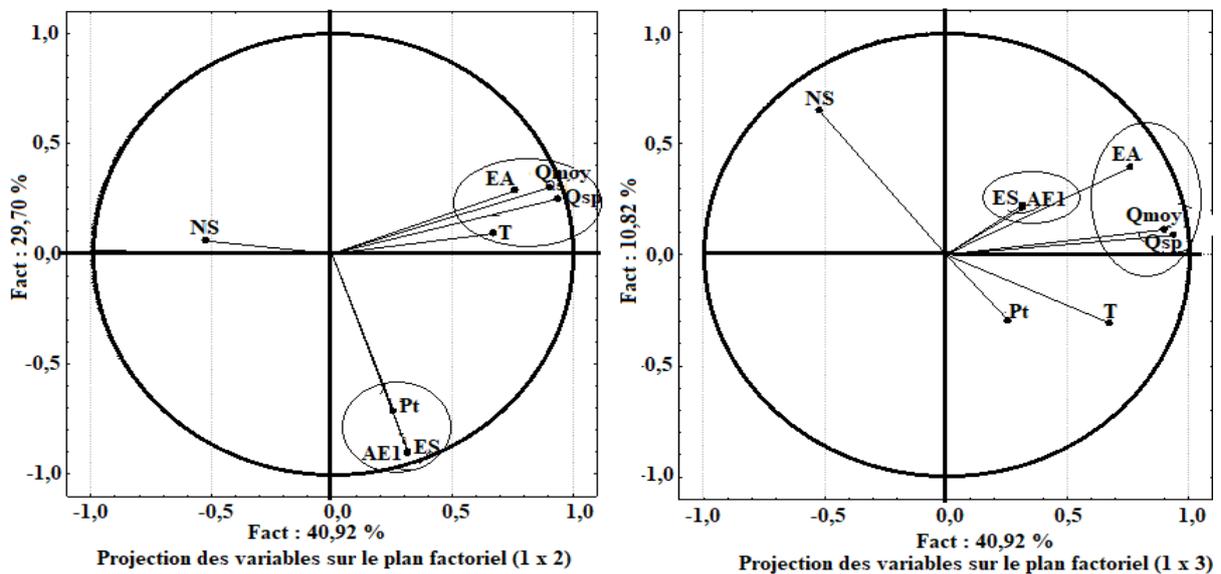


Figure 35 : Cercle de communauté des plan factoriel F1-F2 et F1-F3

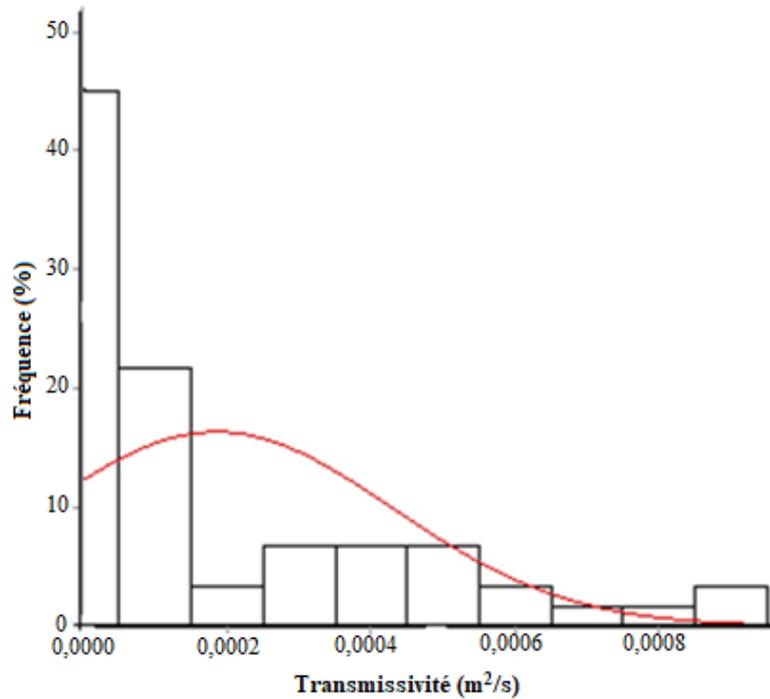
## 6.2 Analyse géostatistique des paramètres hydrodynamiques

### 6.2.1 Analyse exploratoire des données

#### 6.2.1.1 Transmissivité

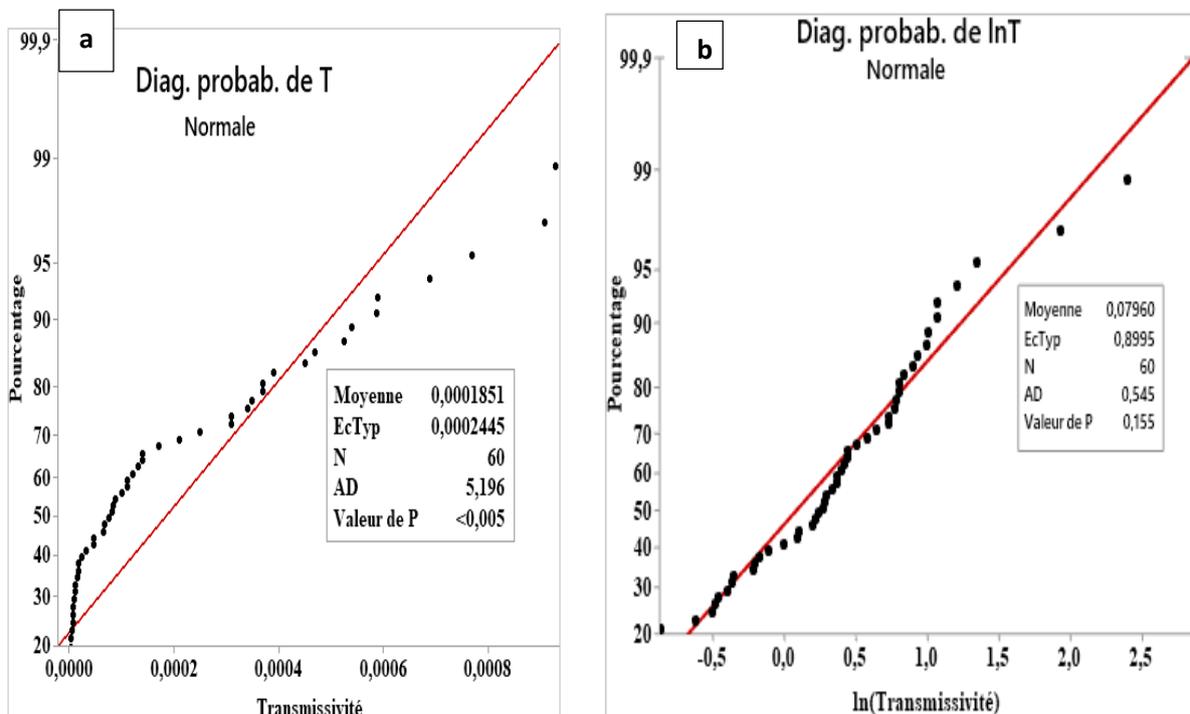
L'histogramme des valeurs présente une distribution asymétrique relativement pointue et étalée vers la droite avec une fréquence plus élevée pour les valeurs inférieures à  $2.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Cette distribution met en question la normalité des données (Figure 37).

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 36 :** Distribution de la transmissivité: Ajustement à une loi normale

La droite d'Anderson-Darling (Figure 38) se présente comme une courbe dont la pente augmente avec les valeurs de la transmissivité élevées. Un passage à une échelle logarithmique nous donne une tendance linéaire (Figure 38b). À cet effet, nous devons prendre en compte les logarithmes des observations pour toute modélisation de la distribution suivant une loi Gauss.

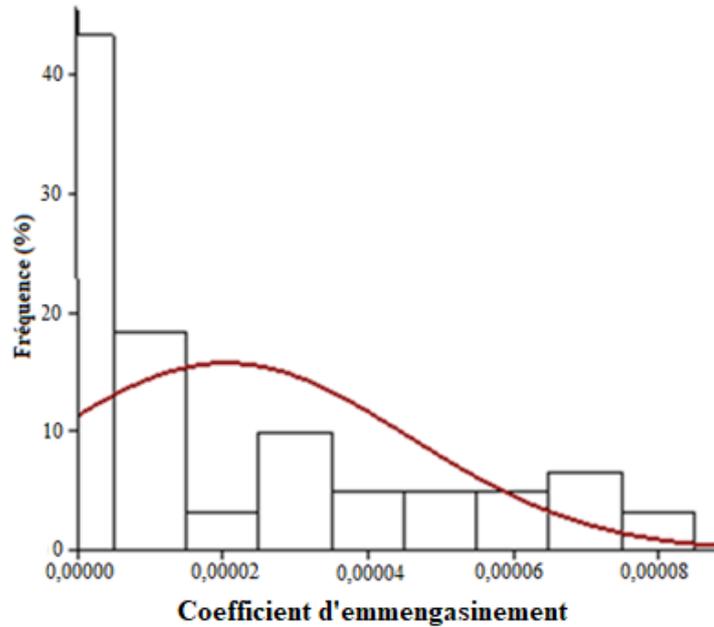


**Figure 37:** Droite d'Anderson-Darling (T)

a : Valeurs brutes (T), b :  $\ln(T)$

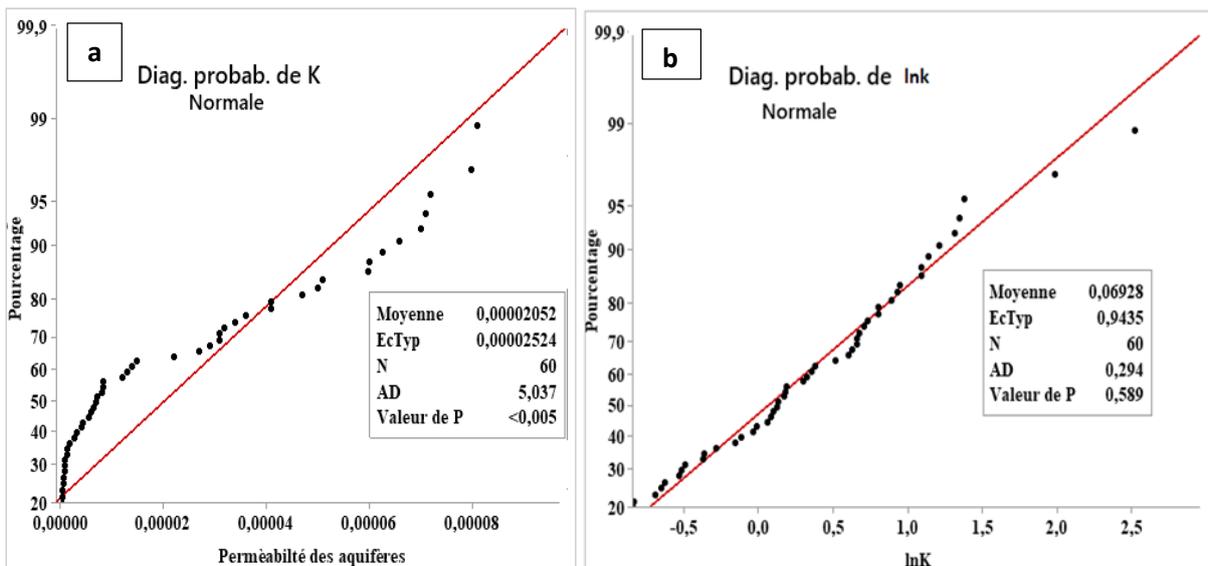
**6.2.1.2 Coefficient d’emmengasinement**

La distribution du coefficient d’emmengasinement est dissymétrique, étalée vers la droite dans le sens des valeurs élevées de ce paramètre (figure 39). Comme dans le cas de la transmissivité, le coefficient d’aplatissement s’éloigne de zéro et est différent du coefficient d’assymétrie.



**Figure 38** : Distribution du coefficient d’emmengasinement: Ajustement à une loi normale

La droite d’Anderson-Darling (Figure 40) est similaire à celle des données de transmissivité. On observe également l’augmentation de la pente avec les valeurs variables du coefficient d’emmengasinement, traduisant ainsi la dissymétrie de la distribution. Le passage à l’échelle logarithmique (Figure 41b) nous donne une tendance linéaire.



**Figure 39**: Droite d'Anderson-Darling (S')  
 a : Valeurs brutes (S'), b : ln(S')

6.2.1.3 Débits spécifiques

L’histogramme des valeurs présente une distribution asymétrique relativement pointue et étalée vers la droite. Cette distribution met en question la normalité des données (Figure 41).

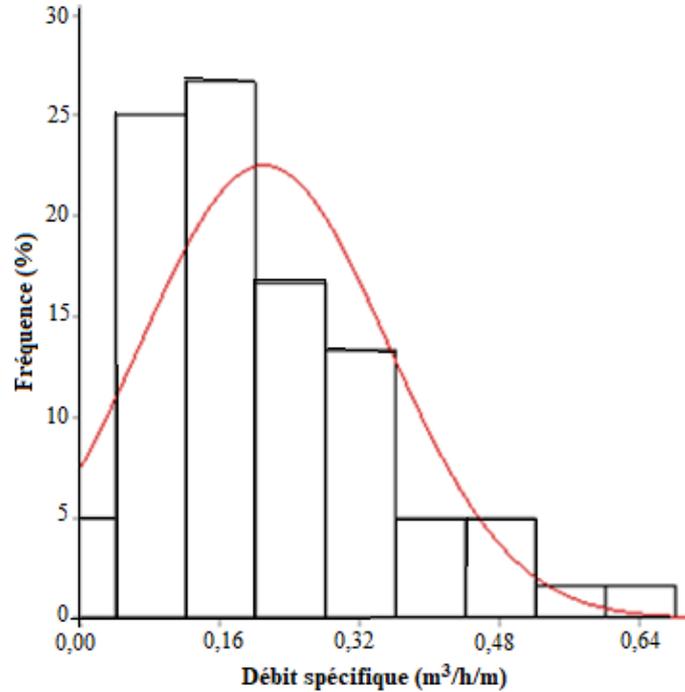


Figure 40 : Distribution du débit spécifique: Ajustement à une loi normale

La droite d’Anderson-Darling (Figure 42) présente un p-value inférieur à 0,005 traduisant ainsi la dissymétrie de la distribution. Le passage à l’échelle logarithmique (Figure 43b) donne une tendance linéaire avec un P-value acceptable.

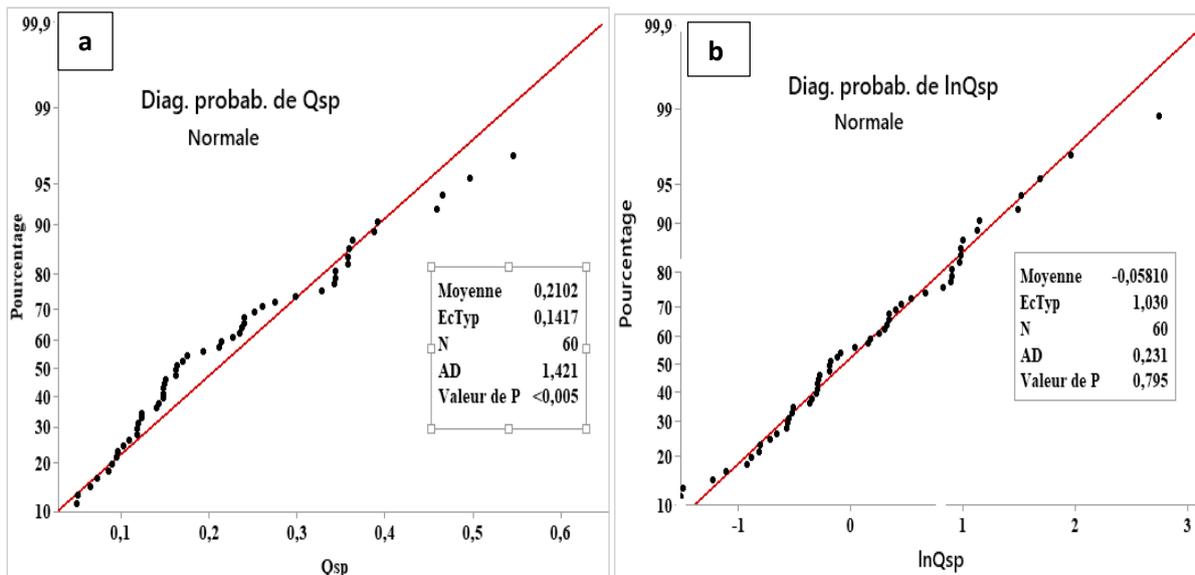


Figure 41: Droite d'Anderson-Darling (Qsp)

a : Valeurs brutes (Qsp), b : ln(Qsp)

## RESULTATS ET DISCUSSION

Le rapport entre l'écart absolu moyen et l'écart type pour une loi normale doit être asymptotiquement égal à  $\sqrt{\frac{2}{\pi}}$  ( $\approx 0,7979$ ). Dans le tableau XXI, ce rapport montre des valeurs éloignées de  $\sqrt{\frac{2}{\pi}}$ . L'éloignement des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des différents paramètres caractéristiques des paramètres hydrodynamiques de zéro (Tableau XXII) pourrait justifier l'application logarithmique à ces derniers afin d'avoir une tendance au rapprochement à la loi normale.

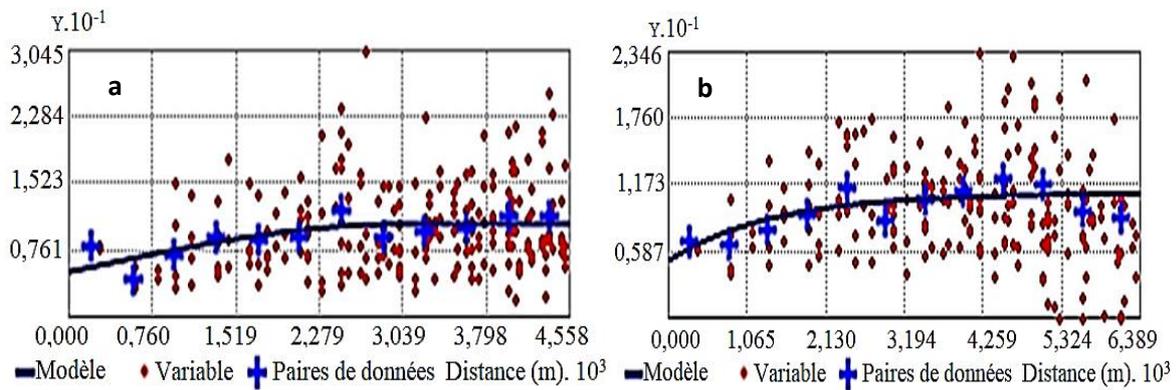
**Tableau XXII** : Synthèse statistique

	T (m <sup>2</sup> /s)	S'	Qsp (m <sup>3</sup> /h/m)
Ecart type	1,35E-05	1,60E-05	0,17
Ecart Absolu Moyen (MAD)	0,000003865	0,00005264	0,9843
Aplatissement	2,52	-0,68	0,63
Asymétrie	1,5	1,08	0,97
MAD/Ecart type	2,86E-01	3,29E+00	5,79E+00
Nbre Echantillon	60	60	60

### 6.2.2 Variogramme directionnel

#### 6.2.2.1 Transmissivité

Le résultat de la modélisation des valeurs transformées de la transmissivité est présenté par la figure 43. Le variogramme calculé indique 3798 points expérimentaux et 12 paires de données.



**Figure 42** : Ajustement aux modèles  
a : Modèle sphérique b : exponentiel

Les résultats des différents paramètres des variogrammes pour les valeurs logarithmiques de la transmissivité sont consignés dans le tableau XXIII.

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau XXIII :** Caracteristiques des variogrammes (logT)

Type modèle	Sphérique	Exponentiel
Pépite (m <sup>2</sup> /s) <sup>2</sup>	6,7	5,9
Portée (m)	3039	4259
Palier	23,75	17,56

Les variogrammes modélisés de la transmissivité présentent les caractéristiques suivantes :

- l'existence d'un palier de 23,75 pour le modèle sphérique et de 17,56 pour le modèle exponentiel. Le palier correspond à la valeur autour de laquelle se stabilise le variogramme ;
- l'existence d'une portée de 3039 m pour le modèle sphérique et 4259 m pour le modèle exponentiel. Cette valeur représente la distance d'autocorrélation ; c'est-à-dire, il y a corrélation spatiale pour les couples de points distants de moins de 3039 m pour le modèle sphérique et de 4259 m pour le modèle exponentiel. Au-delà de cette distance, il y a indépendance entre deux points distants d'une valeur de h même très proche ;
- l'existence d'un effet de pépite de 6,7 et 5,9 (m<sup>2</sup>/s)<sup>2</sup> respectivement pour le modèle sphérique et exponentiel. L'effet de pépite correspond à la valeur de  $\gamma(h)$  quand h tend vers 0. Il représente la discontinuité à l'origine.

Le modèle est considéré comme valable si l'erreur moyenne et la moyenne de l'écart type sont proches de zéro, la moyenne de l'erreur réduite tend vers 1 et l'écart-type des erreurs d'estimation est proche de l'écart type de l'erreur réduite. En fonction des résultats, nous avons modifié les paramètres du modèle, puis testé le modèle par une nouvelle validation croisée jusqu'à l'obtention des valeurs optimales. Les valeurs numériques retenues de ces paramètres statistiques sont résumées dans le tableau XXIV.

**Tableau XXIV :** Validation croisée pour la transmissivité

	Erreur moyenne	Ecart-type des erreurs d'estimation	Moyenne de l'écart-type de krigeage	Moyenne de l'erreur réduite	Ecart-type de l'erreur réduite
Modèle sphérique	0,028	0,89	0,02	0,95	0,94
Modèle exponentiel	0,0028	0,95	0,003	0,98	0,97

L'écart type de l'erreur réduite pour les deux modèles est suffisamment grand, notamment pour le modèle exponentiel alors qu'il est plus faible et proche de 1 pour le modèle sphérique. Le

## RESULTATS ET DISCUSSION

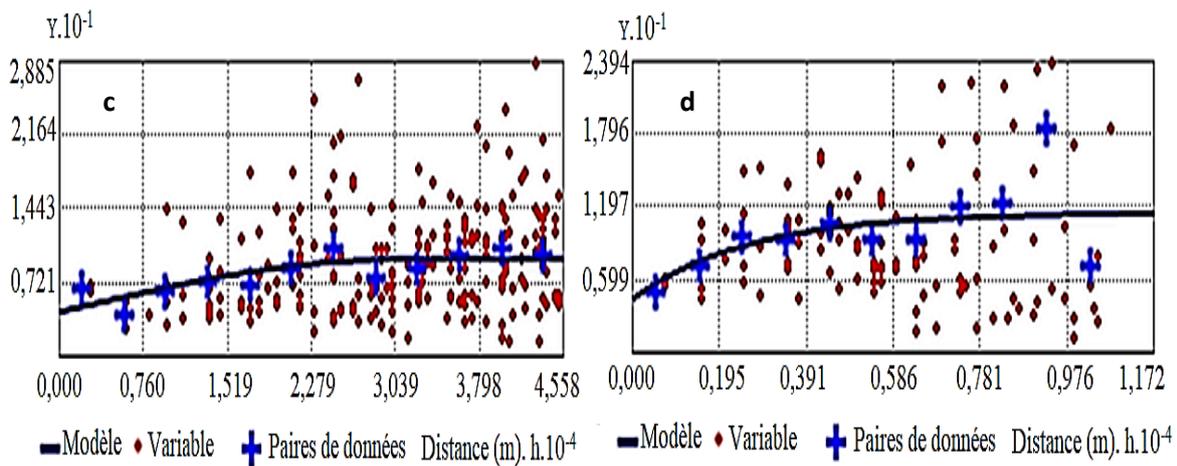
modèle sphérique sera donc utilisé pour l'interpolation, par krigeage ordinaire, des valeurs de la transmissivité de la nappe de Yamoussoukro et Toumodi.

Les paramètres de régionalisation de la transmissivité permettent d'établir l'équation 33 après ajustement au modèle sphérique.

$$\gamma(h) = 23,75 \left[ \frac{3h}{6,09} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{3,03} \right)^3 \right] + 6,7 \quad (\text{Equation 33})$$

### 6.2.2.2 Coefficient d'emménagement

Le résultat de la modélisation des valeurs logarithmiques du coefficient d'emménagement est présenté par la figure 44. Le variogramme calculé indique 2736 points expérimentaux et 12 paires de données.



**Figure 43 : Ajustement aux modèles**  
c : sphérique , d : exponentiel

Les résultats des différents paramètres des variogrammes pour les valeurs logarithmiques du coefficient d'emménagement sont consignés dans le tableau XXV.

**Tableau XXV : Caractéristiques des variogrammes (logs')**

Type modèle	Sphérique	Exponentiel
Pépite	7	5,1
Portée (m)	35614	7814
Palier	21,85	18,84

Les deux variogrammes présentent des valeurs d'effet de pépite (7 pour le modèle sphérique et 5,1 pour le modèle exponentiel) témoignant de l'irrégularité locale du coefficient de la

## RESULTATS ET DISCUSSION

perméabilité des aquifères. En ce qui concerne les portées, elles sont de 35,6 km pour le modèle sphérique et de 7,8 km pour le modèle exponentiel.

Le résultat de la validation croisée est présenté dans le tableau XXVI.

**Tableau XXVI :** Validation croisée pour le coefficient d’emmagasinement

	Erreur moyenne	Ecart-type des erreurs d’estimation	Moyenne de l’écart-type de krigeage	Moyenne de l’erreur réduite	Ecart-type de l’erreur réduite
Modèle sphérique	0,04	0,92	0,04	0,94	0,97
Modèle exponentiel	0,04	0,92	0,04	0,95	0,98

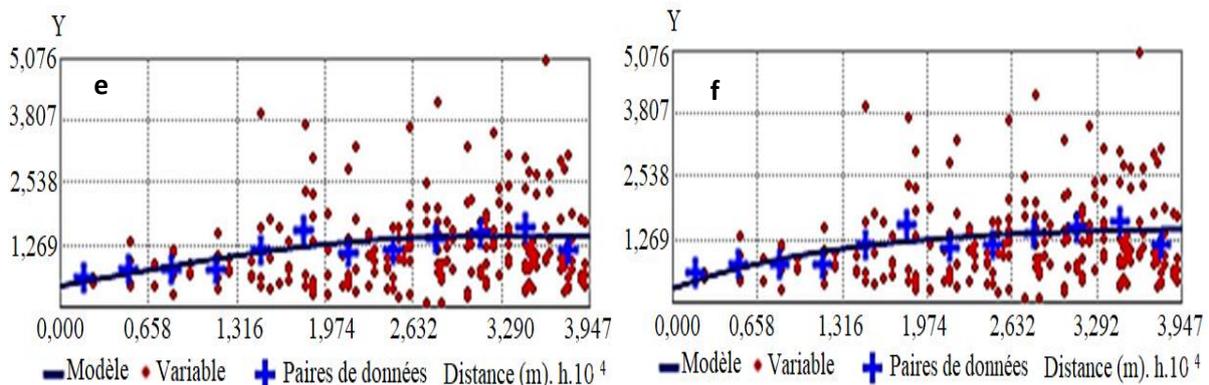
Les valeurs des écart-types de l’erreur réduite sensiblement égales indiquent que l’un ou l’autre des modèles, peut être utilisé pour la détermination des paramètres régionalisés. Cependant, le modèle sphérique présente un meilleur calage pour l’interpolation.

Les paramètres de régionalisation du coefficient d’emmagasinement permettent d’établir l’équations 34 après ajustement au modèle sphérique.

$$\gamma(h) = 21,85 \left[ \frac{3h}{71,2} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{35,6} \right)^3 \right] + 21,85 \quad (\text{Equation 34})$$

### 6.2.2.3 Débit spécifique

Les variogrammes des valeurs logarithmiques du débit spécifique (Figure 45) sont structurés et présente une discontinuité à l’origine. Cette discontinuité serait due aux erreurs de mesures et à l’existence d’une micro-régionalisation. Le variogramme calculé indique 3289 points expérimentaux et 12 paires de données.



**Figure 44 :** Ajustement aux modèles  
e : sphérique, f : exponentiel

Les résultats des paramètres intrinsèques des variogrammes des valeurs logarithmiques du débit spécifique (Log Qsp) sont synthétisés dans le tableau XXVII.

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau XXVII :** Caractéristiques des variogramme (logQsp)

Type modèle	Sphérique	Exponentiel
Pépité (m <sup>2</sup> /h) <sup>2</sup>	0,11	0,14
Portée (m)	30271	39182
Palier	4,9	4,9

Nous constatons l'existence d'un effet de pépité chez tous les variogrammes 0,11 (m<sup>2</sup>/h)<sup>2</sup> et 0,14 (m<sup>2</sup>/h)<sup>2</sup> respectivement pour le modèle sphérique et exponentiel. En ce qui concerne les portées (distance de régionalisation), elles sont de 30,29 km pour le modèle sphérique et 39,1 km pour le modèle exponentiel. Le résultat de la validation croisée est présenté dans le tableau XXVIII.

**Tableau XXVIII :** Validation croisée pour les débits spécifiques

	Erreur moyenne	Ecart type des erreurs d'estimation	Moyenne de l'écart type de krigeage	Moyenne de l'erreur réduite	Ecart type de l'erreur réduite
Modèle sphérique	0,01	1,11	0,01	1,04	1,09
Modèle exponentiel	-0,01	1,10	-0,016	1,02	1,06

Le modèle qui ajuste au mieux les valeurs du débit spécifique est le modèle exponentiel au regard de la faiblesse de l'écart-type de l'erreur réduite.

Cette approche a permis de valider le modèle de variogrammes par rapport au variogramme expérimental et de les incorporer dans l'interpolation par krigeage pour l'estimation des variables des paramètres.

Les paramètres de régionalisation du débit spécifique permettent d'établir l'équation 35 après ajustement au modèle sphérique.

$$\gamma ( h ) = 4,9[1 - \exp(- (\frac{h}{39,18})^2)] + 0,14 \quad \text{(Equation 35)}$$

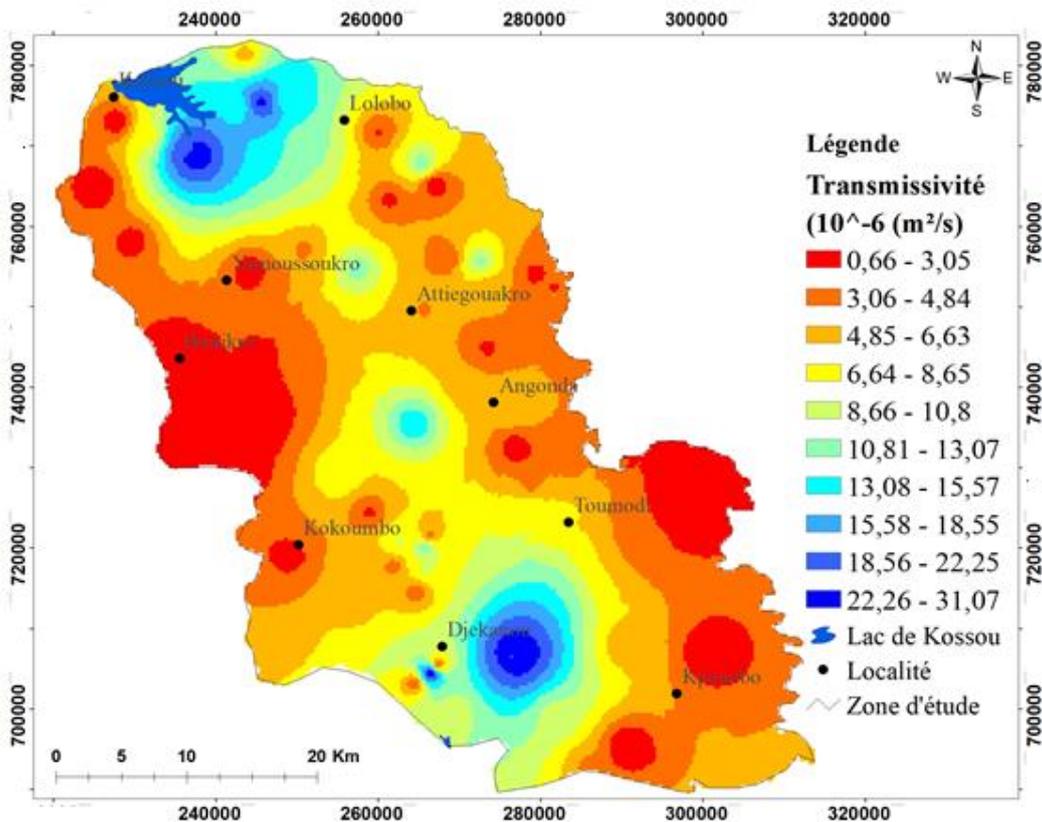
Les différents résultats obtenus montrent que les valeurs log normale de la transmissivité, du coefficient d'emmagasinement et du débit spécifique s'apparentent à des variables régionalisées. Les modèles retenus pour chacune des variables représentent les meilleures structurations et seront donc retenus pour la phase de cartographie.

### 6.2.3 Cartographie par krigeage

Dans le but de reproduire au mieux la variabilité spatiale des valeurs de la transmissivité, le coefficient d'emménagement et le débit spécifique par la méthode de krigeage (c'est-à-dire de prendre en compte le variogramme validé), une cartographie par krigeage a été adoptée.

#### 6.2.3.1 Cartographie par krigeage de la transmissivité

La figure 46 montre la répartition spatiale des transmissivités (en  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) de l'aquifère de Yamoussoukro, Toumodi, Attiéguakro et Djékanou déduite des valeurs estimées par krigeage. Cette carte montre que les fortes transmissivités occupent globalement le secteur Nord et Sud de la zone d'étude. Les secteurs les plus transmissifs ( $T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) représentant environ 20% de la surface d'étude sont localisés le long du lac au Nord de Yamoussoukro et dans les départements de Djékanou. Les plus faibles valeurs ( $T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) sont disséminées sur l'ensemble de la zone.



**Figure 45 :** Carte d'estimation de la transmissivité

La carte de l'estimation d'erreur (figure 47) montre que l'erreur de l'estimation est assez faible sur la nappe aux alentours de Djékanou, Attiéguakro et au Nord de Yamoussoukro. Ceci est en rapport avec le nombre élevé des valeurs observées existant le long de ces zones. L'erreur

## RESULTATS ET DISCUSSION

devient au contraire moins faible à proximité des limites de la zone d'étude, en raison du faible nombre d'ouvrages échantillonnés à ces différents endroits.

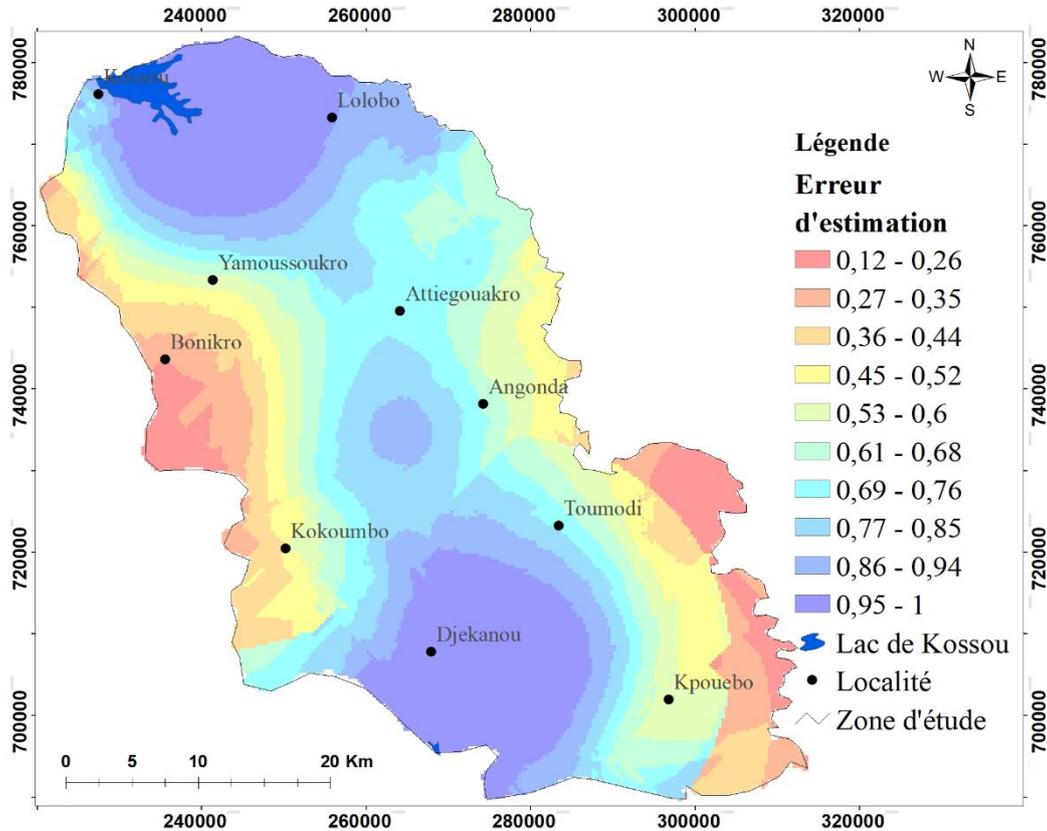


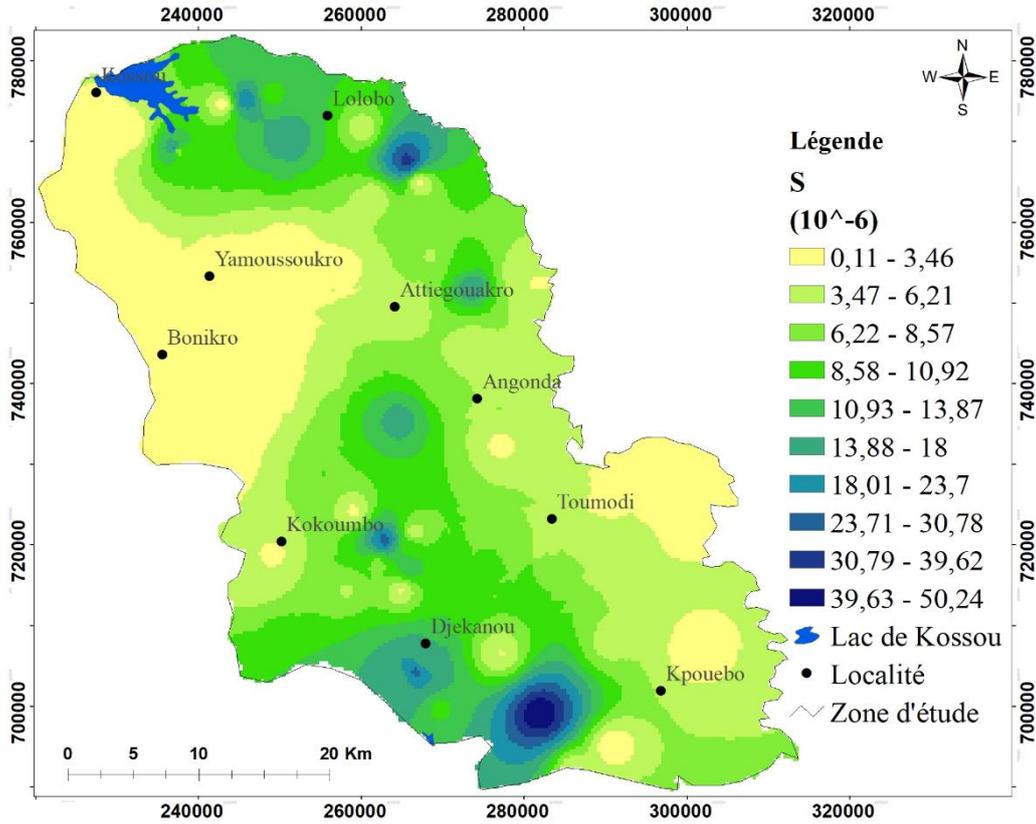
Figure 46 : Carte de l'erreur d'estimation de la transmissivité

### 6.2.3.2 Cartographie par krigeage du coefficient d'emmengasinement

La figure 48 présente la distribution des valeurs du coefficient d'emmengasinement sur l'ensemble de la zone d'étude. L'ensemble de la zone est caractérisé par des valeurs assez faibles. Toutefois, il y a des valeurs relativement moyennes et élevées dans les sous préfectures de Lolobo, Djékanou, Bonikro et Angonda.

Ces valeurs fortes et moyennes pourraient être dû au fait que ces différentes parties de la zone d'étude sont constituées en grande partie de formations schisteuses plus poreuse. Ainsi, les fortes valeurs au niveau des schistes peuvent s'expliquer par l'existence au sein de ces roches de structures feuilletées leurs permettant de retenir plus d'eau.

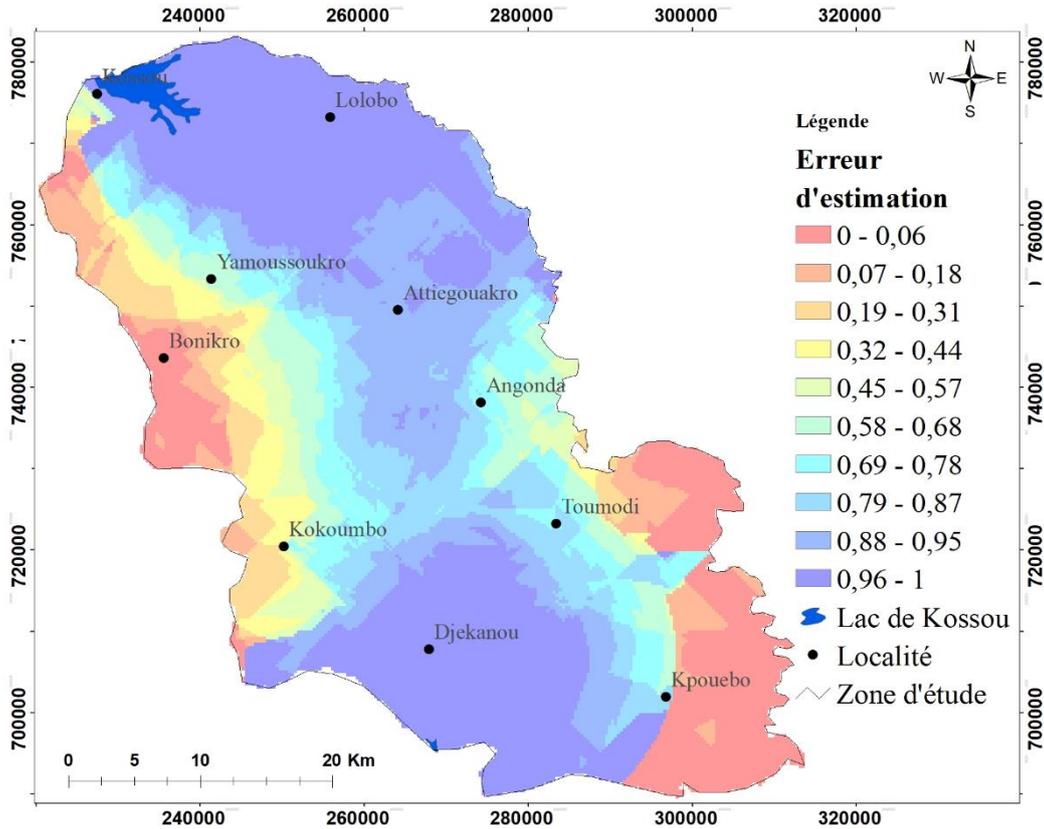
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 47:** Carte d'estimation du coefficient d'emmengasinement

Les erreurs d'estimation calculées par le krigeage ordinaire sont indiquées à la figure 49. L'examen de cette figure montre que les faibles valeurs de l'erreur d'estimation se situent à Djékanou, Attiéguakro et dans le Nord du département de Yamoussoukro. Dans ces endroits, on trouve une abondance de valeurs mesurées. Par opposition, l'erreur devient de plus en plus importante sur le reste de la zone, notamment vers les bordures où les valeurs de la perméabilité des aquifères restent méconnues.

## RESULTATS ET DISCUSSION

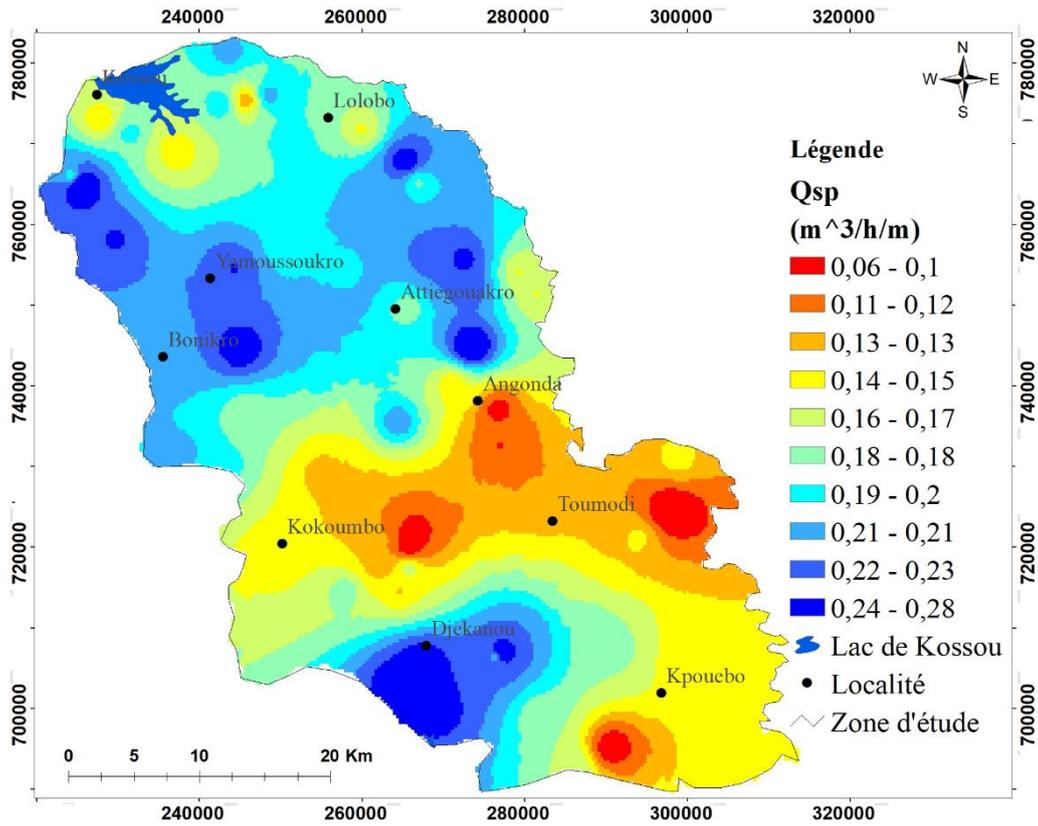


**Figure 48:** Carte de l'erreur d'estimation du coefficient d'emmengasinement

### 6.2.3.3 Cartographie par krigeage du débit spécifique

Les valeurs du débit spécifique ( $Q/s$ ) déterminées oscillent entre  $6.10^{-2}$  et  $2,7.10^{-1}$   $m^3/h/m$ . Ces valeurs s'échelonnent sur trois ordres de grandeurs. 55 forages ont un débit spécifique supérieur à  $1 m^3/h/m$  soit environ 52,25 % des forages étudiés. Le débit spécifique calculé dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi est d'une manière générale fort. L'analyse de la figure 50 indique que les valeurs élevées se trouve au Sud à Djékanou, à Yamoussoukro et Attiéguakro. Les valeurs les plus faibles sont rencontrées à Toumodi et ses environs.

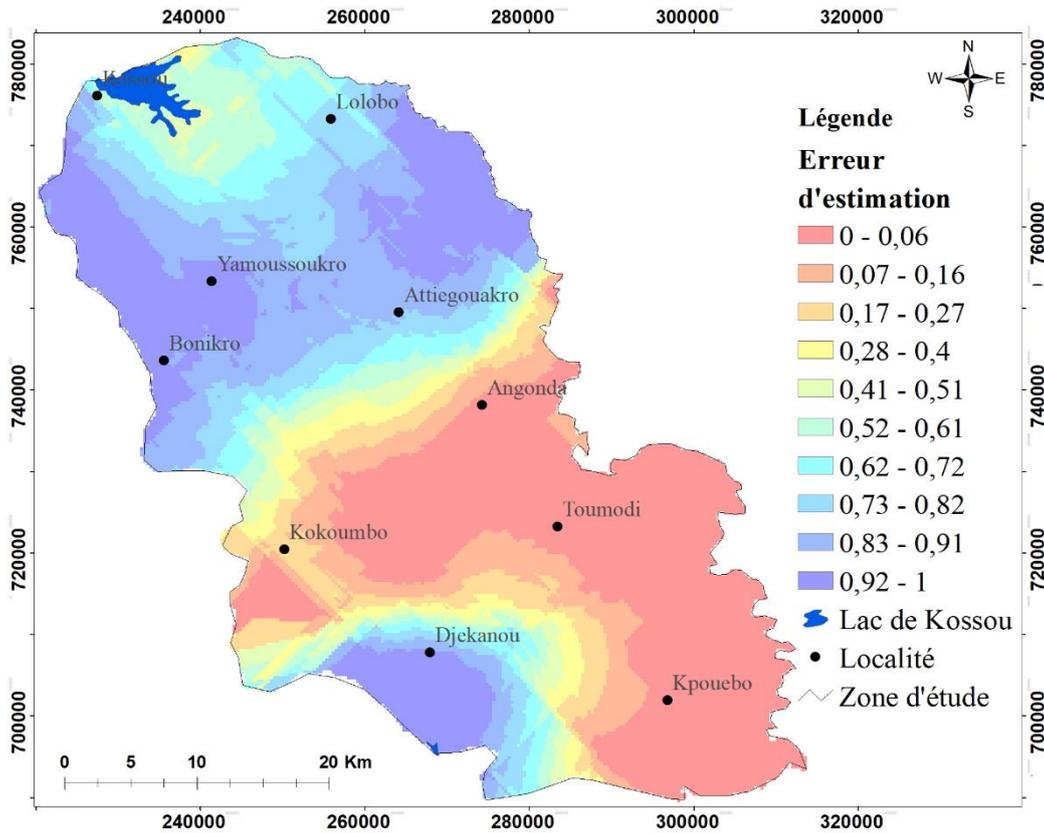
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 49:** Carte d'estimation du débit spécifique

La figure 51 indique les erreurs d'estimation calculées par le krigeage ordinaire. Les faibles valeurs de l'erreur d'estimation se situent dans les parties de la zone où il y a eu plus de points d'échantillonnages. Par opposition, l'erreur devient de plus en plus importante sur le reste de la plaine, notamment vers les bordures où les valeurs du débit spécifique restent méconnues.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 50:** Carte de distribution des erreurs d'estimation des Qsp

### 6.3 Discussion sur l'analyse statistique et géostatistique des paramètres de forages

L'analyse statistique à partir de la Base de Données a mis en relation le débit avec plusieurs paramètres de forages liés à la productivité de l'aquifère. On dénote dans cette étude que le comportement des arrivées d'eau (AE) reste quasiment inchangé au niveau du socle précambrien de la Côte d'Ivoire. En effet tout comme dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi, Lasm (2000) à Man et Youan Ta *et al.* (2015) à Bondoukou, ont relevé une augmentation du débit moyen des AE avec la profondeur (au environ de 30 m de profondeurs) suivie d'une réduction de ces débits autour de 50 m dans le socle. A des profondeurs élevées ( $> 50$  m dans le socle), les AE sont rares, mais souvent productives. Ces résultats sont en accord avec les études fixant la limite inférieure d'existence de fissures ouvertes entre 50 et 70 m de profondeur (Jourda, 2005). L'évolution du débit et des épaisseurs d'altération semblerait ne pas évoluer dans le même sens. Selon Mangoua *et al.* (2010), cette conclusion est tirée parce que les paramètres tels que la nature des altérites, la roche mère dont sont issus ces altérites ne sont pas pris en compte. Par ailleurs, les recherches de Berger *et al.* (1980) ont montré qu'en Côte d'Ivoire, la productivité des forages augmente avec l'épaisseur des altérites sur les roches cristallines et cristallophylliennes. Généralement, les débits d'exploitation supérieure à  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  se rencontrent dans les zones où les épaisseurs d'altérites sont comprises entre 10 et 70 m (Biscaldi, 1967). Dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi, les débits forts ( $Q > 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ) s'observent entre 15 et 45 m. Ce résultat vient en complément à d'autres travaux effectués en Côte-d'Ivoire. En effet, dans la région

## RESULTATS ET DISCUSSION

d'Oumé, il ressort que la tranche [0-30 m] d'épaisseur d'altérites est propice à l'obtention de débits forts (Baka *et al.*, 2019) et à Bondoukou entre 10 et 40 voire 45 m (Mangoua, 2013). En ce qui concerne la profondeur, Kouadio *et al.* (2010) ont estimé qu'il existe une profondeur au-delà de laquelle, les chances de trouver un horizon aquifère à bon débit sont minces, plus précisément dans les roches de socle altérée. Par conséquent, une certaine tranche de profondeur optimale sensée avoir une productivité satisfaisante (80 m sur granites, et 100 m sur schistes) a été définie par plusieurs auteurs (Biémi, 1992 ; Kouadio *et al.*, 2010) cité par Gnamba *et al.* (2014). Au regard des forages étudiés dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi, la profondeur optimale de productivité est comprise entre 60 et 90 m. La relation entre la productivité et la nature des aquifères qui a été abordée dans cette étude montre que les schistes sont plus productifs que les granites. Ces résultats concordent avec les travaux d'un certain nombre d'auteurs ayant travaillé en Côte d'Ivoire dans la zone de socle (Biémi, 1992 ; Dibi *et al.*, 2004). Ces auteurs dans leur ensemble attestent la bonne productivité des forages dans les schistes en zone de socle ivoirien. Selon Mangoua et al (2010), cela serait favorisé par certaines conditions topographiques. Les différentes valeurs de transmissivité obtenues dans la zone d'étude varient entre  $3,01 \cdot 10^{-6}$  et  $6,69 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  avec une moyenne de  $8,38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  et un coefficient de variation de 16,11. Elles s'apparentent aux valeurs obtenues en Côte d'Ivoire par Dibi *et al.* (2004) dans la région d'Aboisso, Ahoussi (2008) dans la région d'Agboville et Kouassi *et al.* (2013) dans la région du N'Zi Comoé. Ces transmissivités sont hétérogènes, avec de faibles valeurs. Les transmissivités les plus importantes se rencontrent sur les terrains granitiques. Cela pourrait s'expliquer par la présence d'un réseau de fracturation communicatif. En effet, la diversité de direction de linéaments leur confère l'avantage d'être plus transmissifs et à cela, il faut ajouter la présence de filons et joints secs (Niamké *et al.*, 2008). La dispersion des valeurs de transmissivité est conforme aux résultats déjà obtenus dans les formations analogues en Côte d'Ivoire par les auteurs tels que Biémi (1992), Savané (1997) et Lasm (2000). La grande dispersion des valeurs des différents paramètres hydrodynamiques provient plus des variations quantitatives et qualitatives de la fracturation (Bahir *et al.*, 2008) qu'à l'hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés au niveau de la région. En effet, la recherche des eaux souterraines en milieu de socle repose essentiellement sur le repérage des fractures qui sont les témoins des déformations tectoniques. Ainsi, un forage qui ne traverse aucune fracture ne peut produire de l'eau (Kouadio *et al.*, 2010). Dans cette zone, la transmissivité est corrélée avec les débits de forage avec un coefficient de 0,77.

La transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et le débit spécifique sont des paramètres très variables dans l'espace et les données disponibles obtenues des tests de pompage sont souvent rares et en faible quantité. Cette difficulté peut être résolue par une estimation de ce paramètre à l'aide de la géostatistique. Le calcul des différents variogrammes a permis de

## RESULTATS ET DISCUSSION

montrer que les valeurs transformées de ces paramètres (Log) sont structurées. Ces résultats sont en accord avec les travaux de certains auteurs (Delhomme, 1978 ; Alassane, 2004 et Aïssata, 2010) qui montrent que la structuration est meilleure avec les valeurs logarithmiques (Youan-Ta, 2008).

L'analyse variographique a mis en évidence la présence d'effet de pépite pour tout les variogrammes. En effet, l'effet de pépite est en général dû à l'effet combiné de deux (2) raisons principales (Lasm, 2000) :

- l'existence d'une micro-régionalisation ;
- l'existence d'incertitudes de mesures.

Les différents résultats ont montré que les erreurs réduites les plus fiables ont été obtenues avec le modèle sphérique pour la transmissivité et le coefficient d'emmengasinement, et le modèle exponentiel pour le débit spécifique.

La structuration spatiale des variogrammes (existence d'un palier, d'une portée et d'un effet de pépite) implique que la transmissivité, le coefficient d'emmengasinement et le débit spécifique se comportent comme des variables régionalisées. Cette bonne structuration de ces paramètres dans l'espace permet d'envisager leur estimation sur l'ensemble de la zone d'étude. La discontinuité à l'origine signalée, est un phénomène couramment rencontré dans la littérature (Lasm 2000 ; Jourda, 2005 ; Soro *et al.*, 2010). Les distances de structuration de l'ordre 4,12 km pour la transmissivité, 2,94 Km pour le coefficient d'emmengasinement et 4,9 Km pour le débit spécifique indiquent que la structuration dans cette partie de la Côte d'Ivoire est importante sans doute du fait de la bonne inter-connectivité des fractures. Des études analogues menées dans différentes régions de la Côte d'Ivoire, par Lasm (2000), Jourda (2005), Lasm *et al.* (2008), Youan-Ta (2008) et Soro *et al.* (2010) ont donné respectivement des valeurs de 6,6 km (à l'Ouest), 4,5 km (au Nord) et 10,08 km (à l'Est), 5,08 km (Nord-Est) et 3,4 km (au Sud). Au Sud-Est de la Côte d'ivoire, Soro *et al.* (2010) déterminent une portée de 0,858 km à partir d'un variogramme très mal structuré du fait sans doute du faible nombre de données disponibles (38 points de mesures au total). Le nombre de points de mesure expliquerait la valeur de la portée et jouerait un rôle important dans la forme du variogramme et partant influencera sur la qualité de l'estimateur. En effet, plus les données disponibles sont nombreuses, meilleur sera le variogramme.

Les fortes valeurs de coefficient d'emmengasinement observées en certains endroits sur la carte pourraient être dues à une densité de fracturation de la région et aussi à la nature de ces roches. En effet, les études de terrain réalisées par Bard (1974) et Yao *et al.* (1995) ont permis de mettre en évidence deux accidents majeurs dans les formations de la région. Il s'agit entre autres de

l'accident de Dimbokro et l'accident du N'zi (Koïta, 2010). D'autres accidents ont été répertoriés par Delany (1965), Yao *et al.* (1995) dans Koïta (2010) et lors de campagnes de terrain réalisées dans la région en 2008 par Koïta.

### **Conclusion partielle**

Les analyses spatiales, statistiques et géostatistiques effectuées ont mis en relief les épaisseurs d'altération productives moins importantes dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi. De plus, une profondeur optimale comprise entre 60 et 90 m. permettrait d'avoir de bon débit. Les forages implantés sur les schistes donnent des débits plus importants (donc sont plus productifs) que ceux implantés sur d'autres couches géologiques.

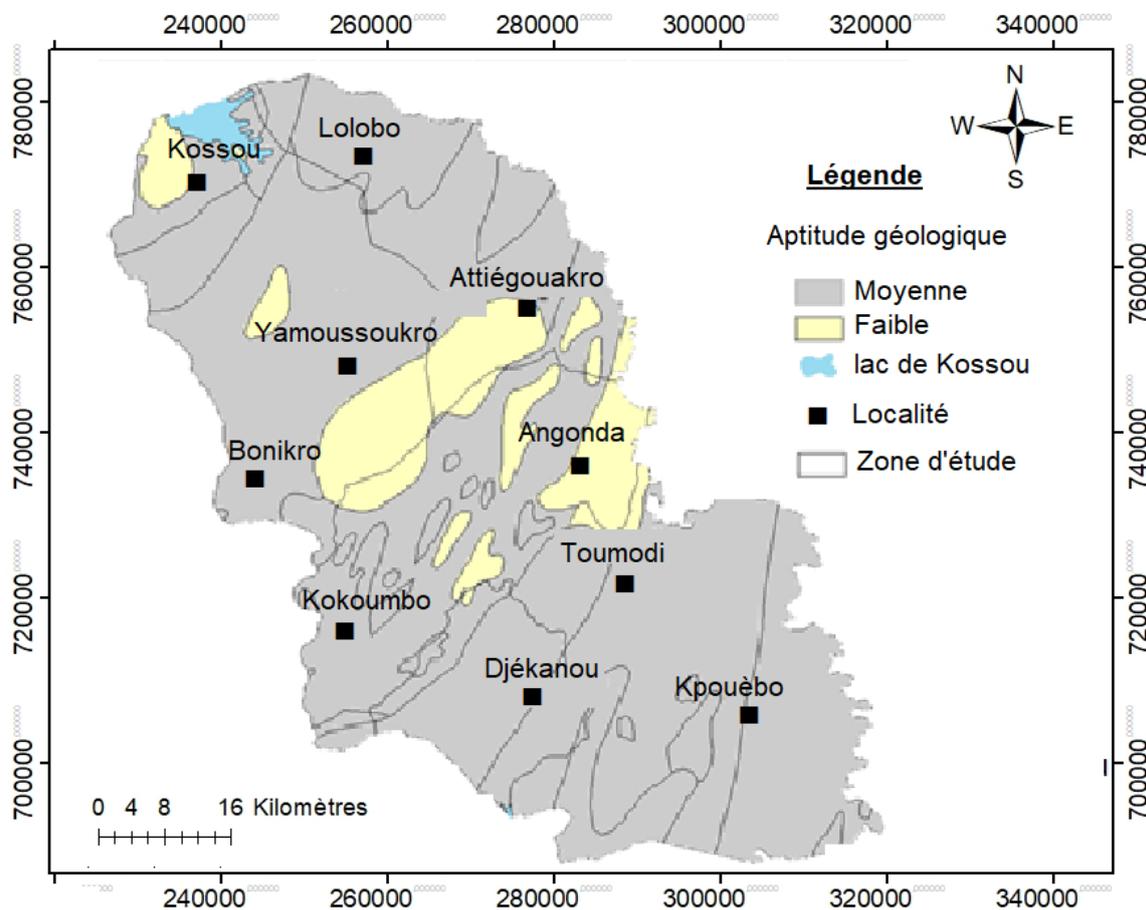
L'analyse géostatistique indique que la transmissivité, le coefficient d'emmengasinement, le débit spécifique, sont bien structurés et s'identifient à des variables régionalisées. Le krigeage a permis l'estimation des paramètres sur l'ensemble du champ d'étude grâce à la connaissance des données en quelques points. La géostatistique a permis une meilleure connaissance de ce paramètre hydraulique important sur l'ensemble du domaine étudié.

Les cartes d'estimation de la transmissivité, du coefficient d'emmengasinement et du débit spécifique ainsi obtenues constituent, certes, des outils de décision important et nécessaire notamment pour l'aménagement et la gestion des ressources en eau, en l'occurrence le choix d'implantations d'ouvrages productifs (puits, forages...), et ce pour satisfaire les besoins de plus en plus croissants des départements de Yamoussoukro et Toumodi en eau potable.

**CHAPITRE 7 : Zones potentiellement favorables à l'implantation de forages économiques**

**7.1 Carte de l'aptitude géologique**

L'aptitude géologique des départements de Yamoussoukro et Toumodi apparaît presque uniforme (figure 52), avec une dominance de la classe moyenne (95,6%). Dans cette zone, il y a le domaine du socle avec des roches dures, mais avec des conditions partiellement favorables en présence des couches d'altération superficielles. En conséquence, la faisabilité des forages économiques sera fonction de l'accumulation des matériaux d'altération liée aux zones de bas-fonds (ou de faible pente) et à la perméabilité des roches (roches cristallines, en particulier les roches à texture fine donnent des couches d'altération avec forte présence d'argile).



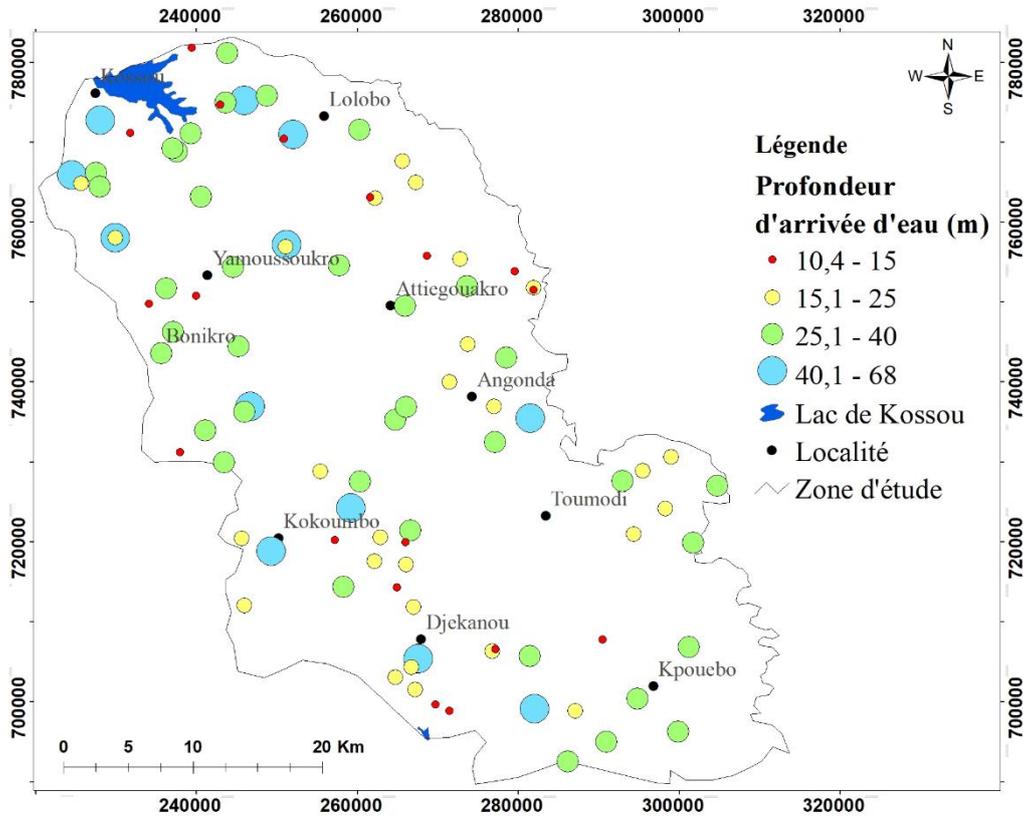
**Figure 51 :** Carte de l'aptitude géologique à la réalisation de forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi.

**7.2 Carte des profondeurs des venues d'eau**

En général dans toute la zone, les premières arrivées d'eau sont peu profondes (Figure 53). Environ 37 % des forages ont des profondeurs d'arrivées d'eau productives qui se situent dans

## RESULTATS ET DISCUSSION

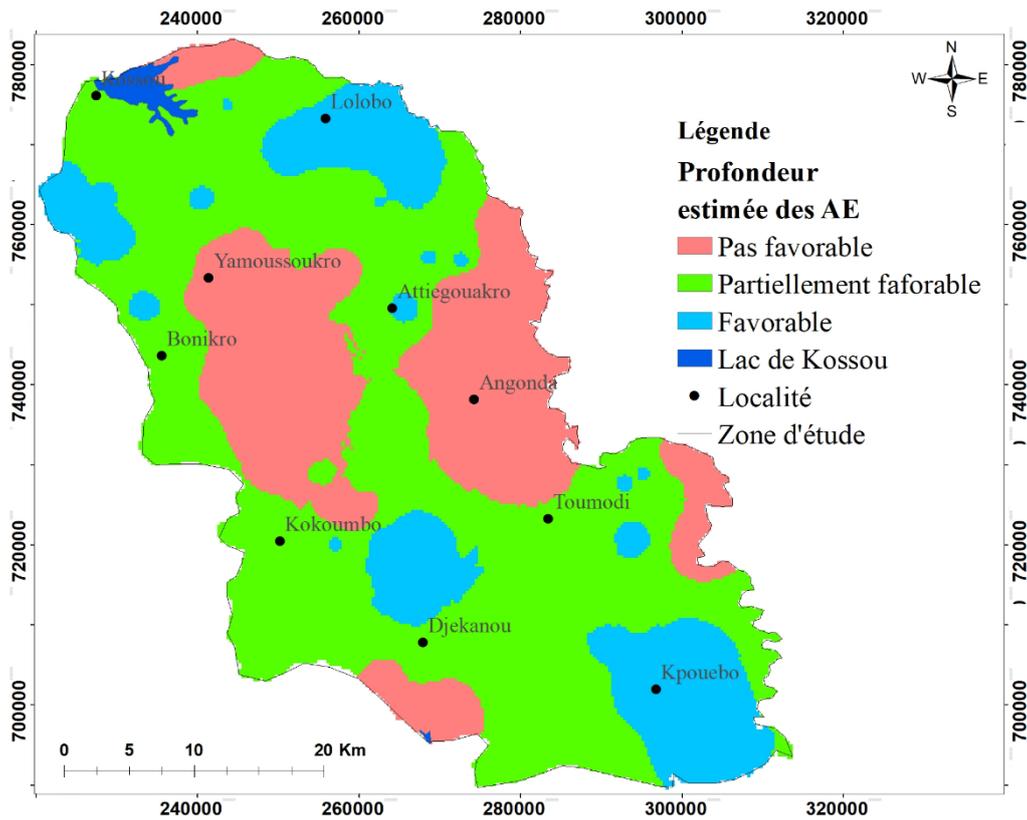
les 25 premiers mètres, 33 % des profondeurs entre 25 et 40 m et 30 % des profondeurs sont supérieures à 40 m.



**Figure 52 :** Carte de distribution des profondeurs des arrivées d'eau dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi

L'interpolation des profondeurs productives sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 54) indique que les zones favorables et partiellement favorables couvrent 80 % de la superficie de Yamoussoukro et de Toumodi. Elles regroupent les sous-préfectures de Lolobo, Kossou, Djékanou, Kpouèbo et Toumodi. Le reste de la zone est non favorable. Ce sont les sous-préfectures de Yamoussoukro, Attiégouakro et Angoda. Dans cette partie on constate la présence de chaînes de montagnes avec des reliefs d'environ 1000 m. Cette zone s'avère être très peu favorable, compte tenu de la nature lithologique du terrain et de la morphologie accidentée.

## RESULTATS ET DISCUSSION

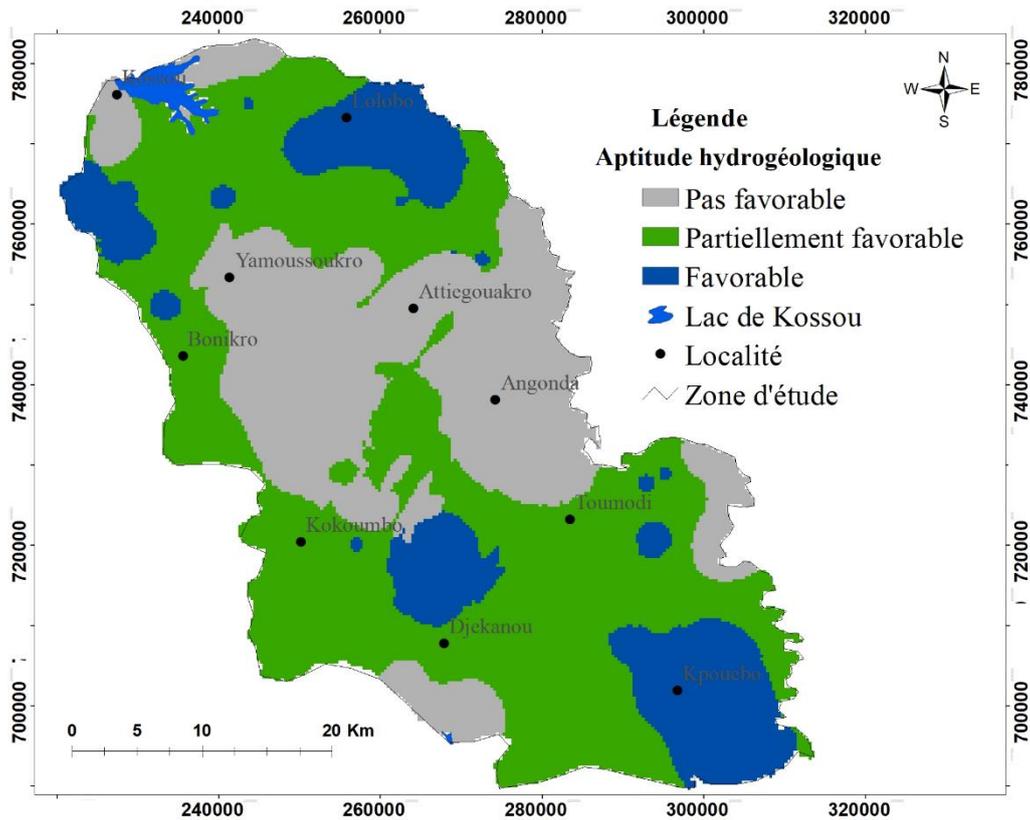


**Figure 53 :** Carte de profondeurs estimées de l'eau dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi

### 7.3 Carte d'aptitude hydrogéologique

Il ressort de la carte de la figure 55, une alternance des conditions pas favorables à favorables (35% de zone pas favorables, 47% partiellement favorables et 18% favorables) à la réalisation de forages économique dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi. Dans la partie Est et Centre, il y a des zones où les conditions ne sont pas favorables, ceci étant essentiellement dû à la profondeur des nappes exploitables. En considérant l'homogénéité de la géologie de cette zone, la distribution de l'aptitude hydrogéologique est influencée principalement par les différences en termes de profondeur de l'eau. Par conséquent, une attention doit être portée aux zones où l'information sur la profondeur de l'eau est faible. Il conviendra alors de vérifier localement les conditions avant la réalisation des forages économique, par exemple par une simple analyse morphologique du secteur et la localisation des cours d'eau et points d'eau en surface.

## RESULTATS ET DISCUSSION

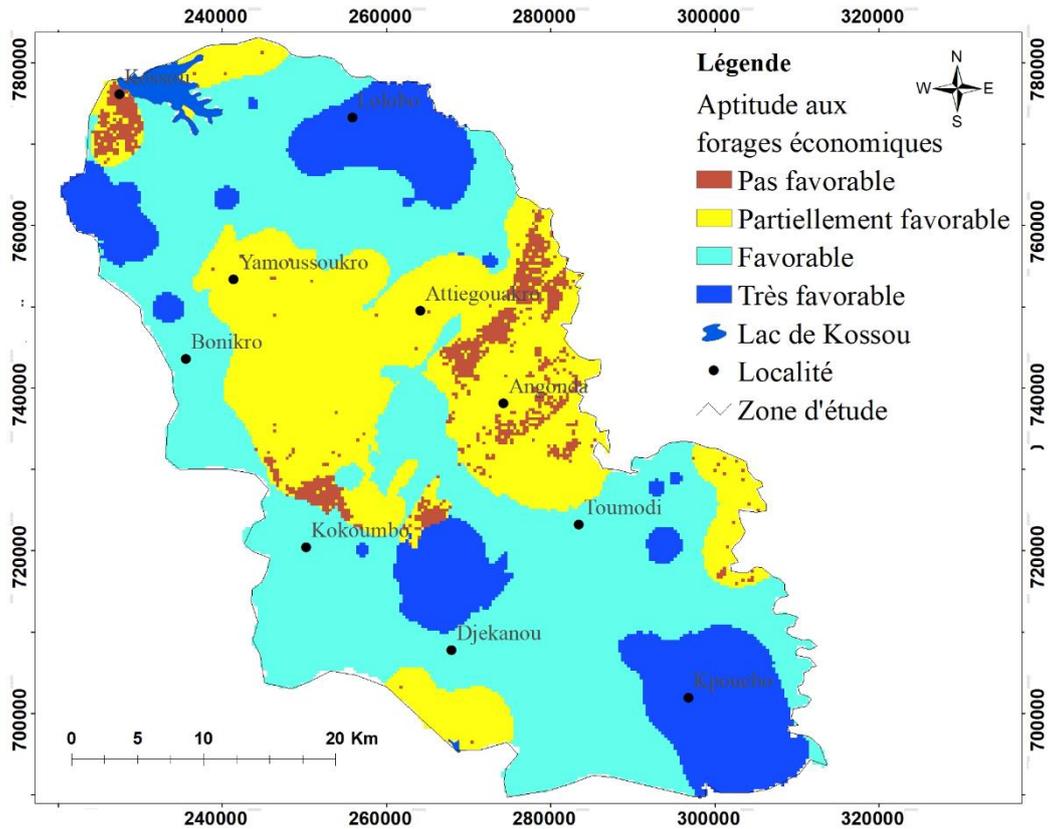


**Figure 54 :** Carte de l'aptitude hydrogéologique à la réalisation des forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi

### 7.4 Cartographie des zones favorables aux forages économiques

La carte définitive des zones favorables à la réalisation de forages économiques (Figure 56) met en évidence quatre classes de faisabilité de forages manuels. 3,84% de la zone n'est pas favorable aux forages économiques. Cette classe se trouve dans les sous-préfectures d'Angonda, d'Attiegouakro Kokoumbo et dans le Sud de Kossou. Les zones partiellement favorables occupent 28,26% de la superficie d'étude. On trouve ces zones principalement dans les zones de Yamoussoukro, Attiegouakro et Angonda. Quant aux zones favorables et très favorables, elles couvrent une surface de 67,9% réparties sur toute la zone d'étude.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 55 :** Carte des zones favorables aux forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi

### 7.5 Discussion sur la détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation de forages économiques

L'étude de la faisabilité de forages économiques dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi, réalisée grâce à la récolte de données géologiques et de données relatives aux points d'eau existants, intégrée avec des analyses morphologiques, a permis l'élaboration d'une carte de zones favorables à l'approvisionnement des eaux souterraines à travers des forages peu profonds (< 40 m). Ces zones pourraient être considérées comme prioritaires pour l'implémentation de forages économiques. La réalisation de cette étude a permis la mise en évidence de zones de substrat cristallin couvert d'une zone d'altération d'épaisseur significative (20- 30 m). C'est un facteur particulièrement favorable aux forages économiques (faible dureté de la couche superficielle). Les formations géologiques de cette zone hébergent souvent des nappes peu profondes (< 25 m), caractérisées par des niveaux saturés peu développés et par des fluctuations saisonnières importantes (Jourda *et al.*, 2015). Les niveaux les plus productifs se situent dans les formations plus sableuses, mais les aquifères existants dans les couches d'altération présentent des caractéristiques de faibles productivités, adaptées à l'exploitation par petits groupes d'utilisateurs (Youan Ta *et al.*, 2008). Ces aquifères peuvent être exploités dans

## RESULTATS ET DISCUSSION

des contextes de petites communautés rurales isolées, mais non de grandes agglomérations (Savané, 1997). Les zones morphologiquement déprimées et à faible pente, ont été considérées comme particulièrement favorables. En effet, les épaisseurs de la couche d'altération dans ces zones sont plus importantes compte tenu de la présence d'aquifères alluvionnaires exploitables par des perforations économiques (faible profondeur de la nappe) (Cheikh, 2007). Ces zones, ont par conséquent, été classifiées et paramétrées dans l'environnement SIG avec des termes de faisabilité plus élevés. Il est aussi important de considérer que les zones de bas-fonds présentent potentiellement des conditions plus favorables, mais qu'en plusieurs situations la population est concentrée dans des zones plus élevées (risque d'inondation et de conditions défavorables du terrain par la présence d'eau stagnante dans les zones basses) (Jourda *et al.*, 2015).

### **Conclusion partielle**

Les conditions hydrogéologiques et géologiques des départements de Yamoussoukro et Toumodi montrent en général des conditions favorables ou partiellement favorables aux forages économiques. En outre plus de 67,9% de la zones d'étude est favorable à l'implantation de forages économiques, repartis sur toute de notre zone d'étude.

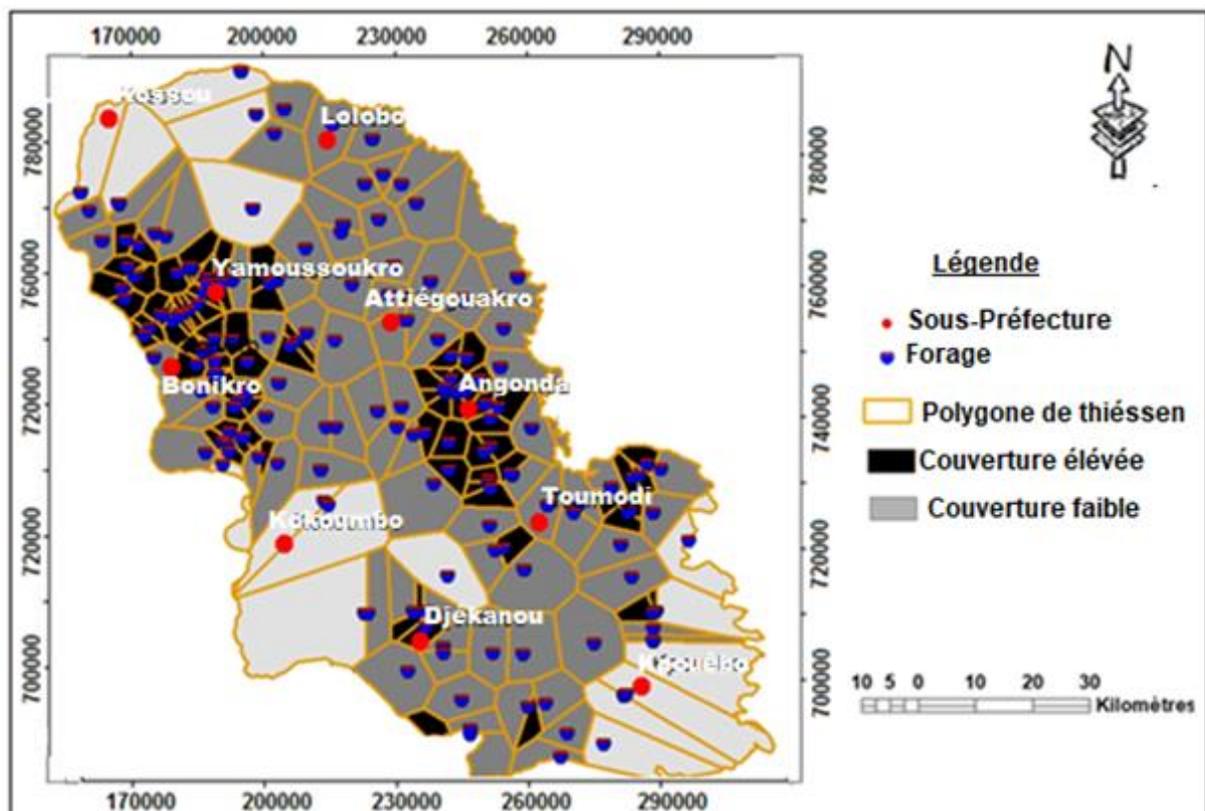
Toutefois, il est important de remarquer que le niveau d'information sur les caractéristiques des points d'eau est limité, c'est pour cela qu'une collecte de données directe sur le terrain est essentielle pour éviter des interprétations peu précises.

**CHAPITRE 8 : Desserte en eau dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi**

**8.1 Analyse de l'état du service d'hydraulique rurale**

**8.1.1 Couverture spatiale**

Le polygone de Thiessen a été généré pour mieux apprécier la couverture spatiale des forages dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi. Il a permis de visualiser la position des forages par rapport aux autres. Cette technique permet de déterminer la densité de couverture des forages (Figure 57).



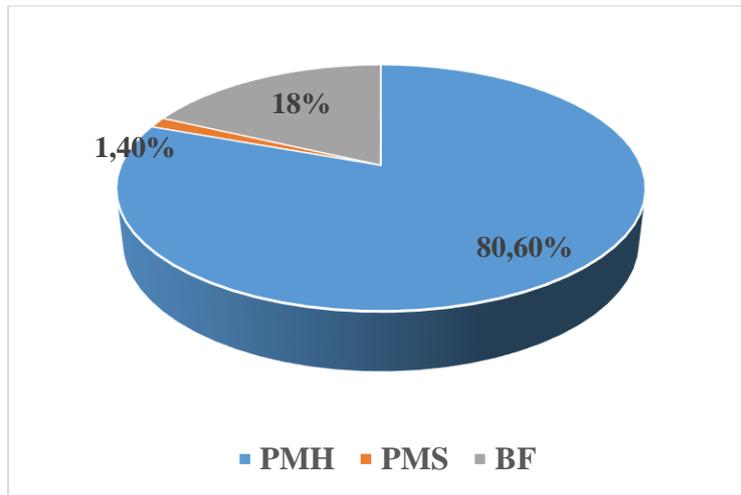
**Figure 56 : Couverture spatiale des forages**

Le polygone de Thiessen couvre les huit sous-préfectures que comptent les deux départements. L'analyse montre une bonne couverture de forage dans les sous-préfectures de Yamoussoukro et Angonda. La couverture est moyenne dans les sous-préfectures de Djekanou, Toumodi, Attiéguakro, et Lolobo. Par ailleurs, dans les sous-préfectures de Kpouébo, Kokoumbo et Kossou, la couverture est beaucoup plus faible. Ce polygone met en évidence les zones à prioriser en cas de campagne d'installation de nouveaux forages dans la zone.

**8.1.2 Typologie de points de service d'eau**

Les localités rurales disposent de 261 Points de Service d'Eau (PSE) tous regroupés en trois catégories comme l'illustre la figure 58.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 57:** Typologie des infrastructures villageoises d'accès à l'eau potable  
PMH : Pompe à Motricité Humaine ; PMS : Pompe à Motricité Solaire ; BF : Borne Fontaine  
La figure 58 révèle que plus de trois quarts des infrastructures d'accès à l'eau potable (80,6%) dans les zones rurales de Yamoussoukro et Toumodi sont des Pompes à Motricité Humaine (PMH) contre 18 % de Bornes Fontaines (BF) et 1,4 % pour les Pompes à Motricité Solaire (PMS). Au nombre de 211, les PMH sont présentes dans tous les départements. Ces pompes (PMH) sont disposées sur les forages sont exploitées grâce à une motricité humaine assurée par les mains ou les pieds des usagers (Figure 59).



**Figure 58:** Pompe à motricité humaine  
a : Pompe à motricité humaine de marque ABY à Amanidjekro (S/P Yamoussoukro), b : Pompe à motricité humaine de marque Vergnet à Totonou (S/P Toumodi)

## RESULTATS ET DISCUSSION

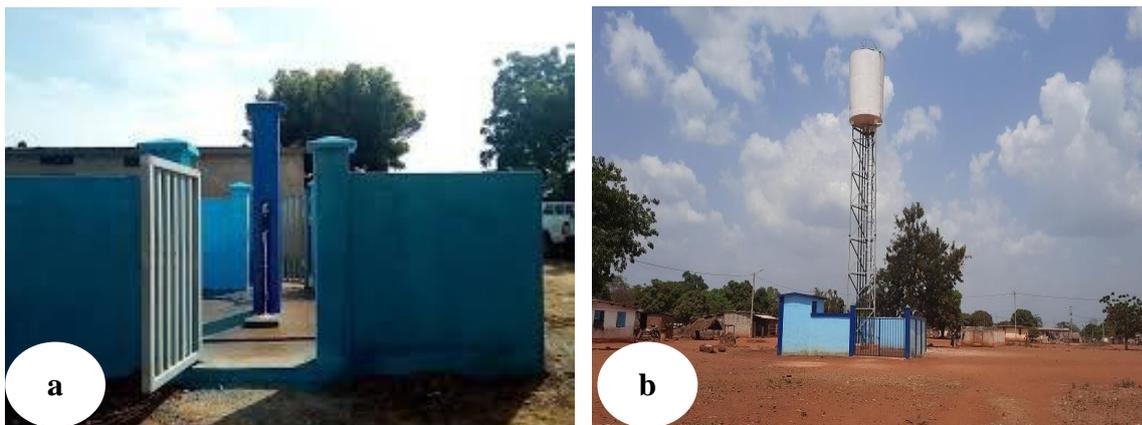
Les pompes à motricité solaire (PMS) sont au nombre de 5, uniquement présents dans les sous-préfectures d'Angonda et Attiégouakro. Ce type de PSE appartient à un ensemble constitué d'un forage, d'un panneau photovoltaïque et de quatre robinets de puisage (Figure 60).



**Figure 59** : Pompe à motricité solaire

a : Service d'eau avec ces 4 robinets de puisage à Tokoreyaokro, b : bêche de stockage d'eau à Koimodiby Kro, c : forage et panneau solaire à N'denou.

Un panneau photovoltaïque alimente la pompe immergée dans le forage. Ce dernier achemine l'eau dans une bêche de stockage après avoir transité dans un local de traitement. Les populations accèdent à l'eau par l'un de robinets de puisage. Les PMH tout comme les PMS sont des PSE des centres de peuplements humains de moins de 1 000 habitants avec le système d'hydraulique villageoise. Les Bornes Fontaines (BF) sont des points publics d'accès à l'eau spécifique à l'Hydraulique Villageoise Améliorée (Figure 61). Dans ce système, les ménages peuvent également disposer de robinets domestiques dans les concessions. Pour ce faire, ils doivent être connectés au réseau d'eau dudit système.



**Figure 60** : Hydraulique villageoise améliorée

a : Borne Fontaine à Mougna, b : château d'eau à Suibonou

Ce système est mis à la disposition des localités dont la population oscille entre 1 000 à 4 000 habitants. Il est constitué d'un forage de production de 2 à 5 m<sup>3</sup> /h, d'un réservoir de 20 à 50

## RESULTATS ET DISCUSSION

m<sup>3</sup> tous deux alimentés par l'énergie électrique et d'un réseau de canalisation simplifié alimentant aussi bien les bornes fontaines que certaines concessions.

### 8.2 Etat de l'exploitation des PSE

#### 8.2.1. Adéquation du système d'approvisionnement de PSE en fonction de la taille de la population

L'inadéquation des systèmes d'approvisionnement en eau potable des départements de Yamoussoukro et Toumodi reste préoccupante (Tableau XXVIII).

**Tableau XXIX :** Distribution des villages PSE suivant le niveau d'adéquation du système d'approvisionnement en eau

Taille démographique	villages avec système non adéquat		villages avec système adéquat		Total villages dotés en PSE	
	Eff.	Fréq. (%)	Eff.	Fréq. (%)	Eff.	Fréq. (%)
Moins de 1 000 hbts	0	0	47	100	47	100
1000-4 000 hbts	63	70,8	26	29,2	89	100
Plus de 4 000 hbts	17	100	0	0	17	100
Total	80	52,3	73	47,7	153	100

Près de 3/4 des villages de 1 000 à 4 000 habitants équipés ont un service d'eau assuré par le système en HV. Pourtant, les normes prévoient le système en HVA. Quant aux villages de plus de 4 000 habitants au nombre de dix sept (17) qui devraient être équipés de système d'Hydraulique Urbaine (HU), aucun ne dispose de ce système.

Au total, 52,3% des villages équipés sont desservis par des systèmes non adéquats.

L'analyse de la figure 62 révèle que l'inadéquation des systèmes d'approvisionnement en eau est étendue sur toute la zone. Toutefois, les sous-préfectures de Kpouèbo, Djékanou, Yamoussoukro et Kossou demeurent les plus affectés. Cette inadéquation des systèmes d'hydraulique a un impact sur la durabilité de l'accès des villageois à l'eau potable.

## RESULTATS ET DISCUSSION

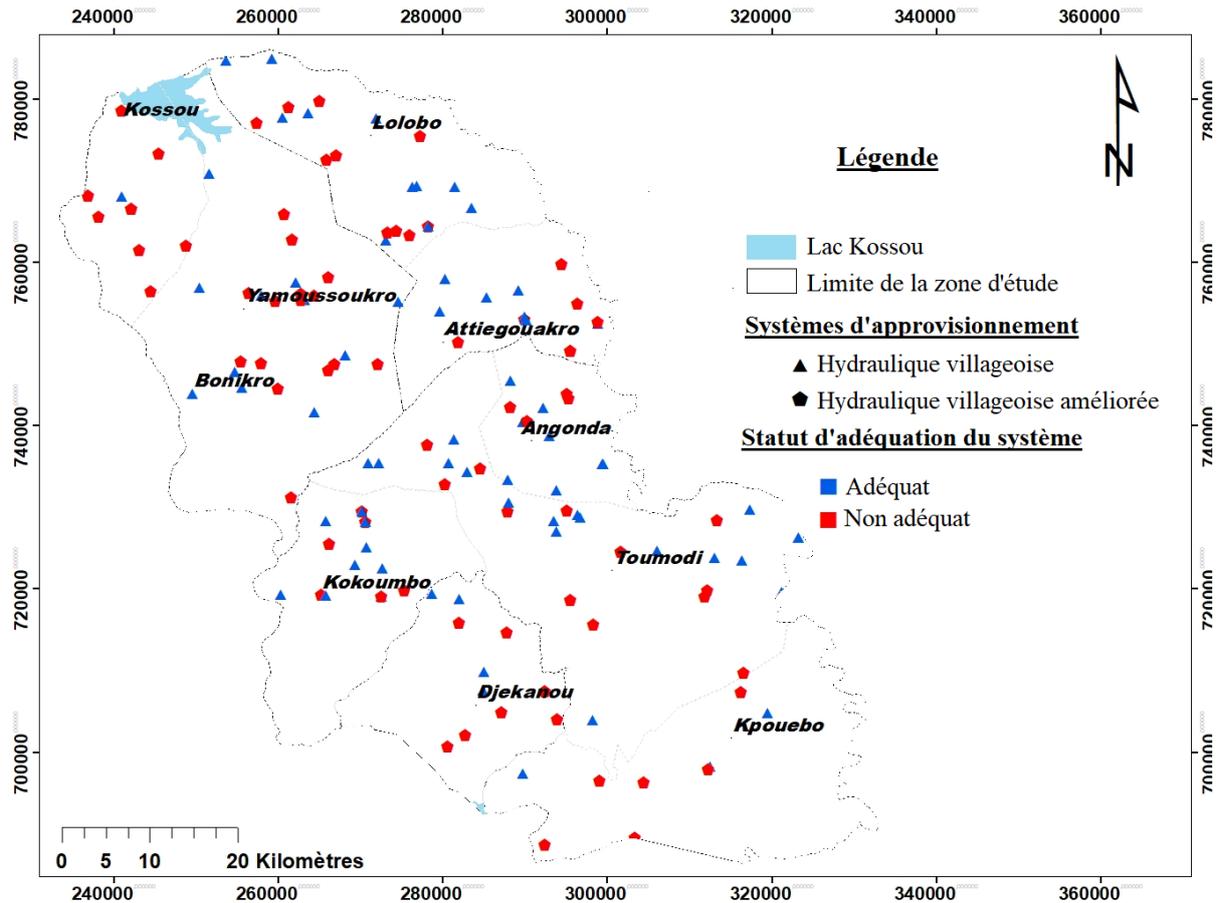


Figure 61 : Etat d'adéquation des équipements d'hydraulique humaine

### 8.2.2 Analyse de la sollicitation des points d'eau par les populations rurales

Les points de service d'eau fonctionnels subissent de fortes pressions démographiques. Celle-ci affecte négativement l'accès des villageois à l'eau potable (Figure 63).

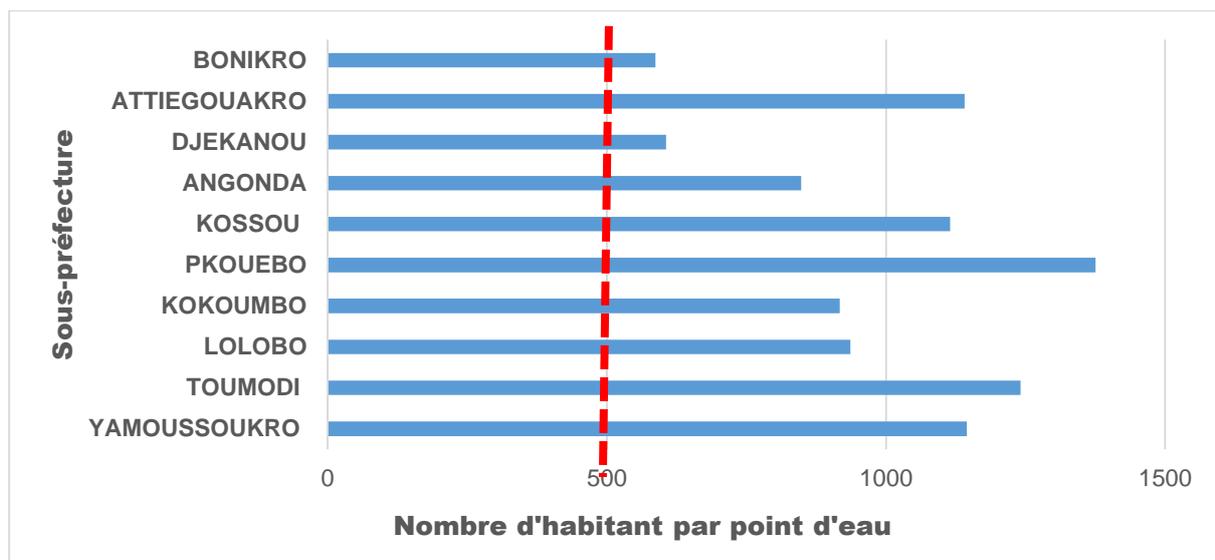
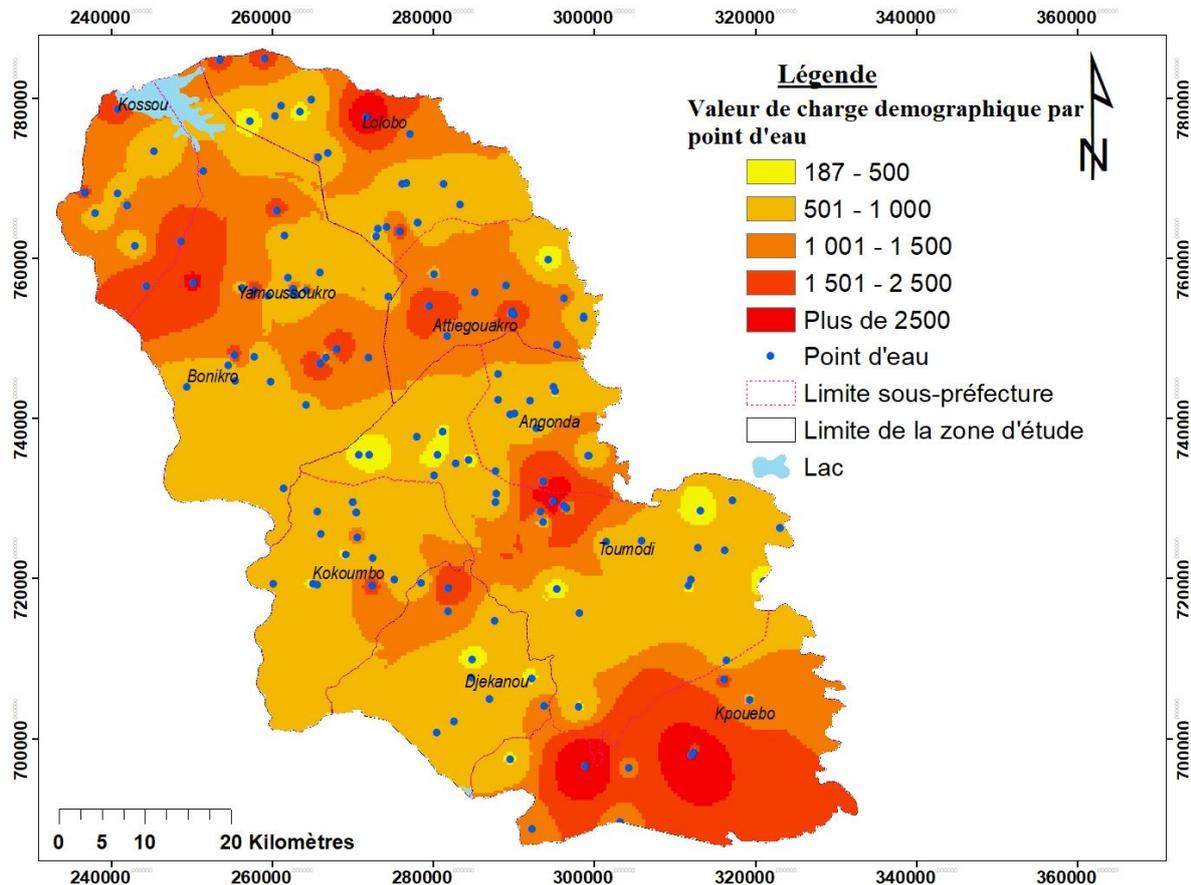


Figure 62 : Nombre de personnes par point de service d'eau

## RESULTATS ET DISCUSSION

L'examen de cette figure 64 met en évidence de fortes charges démographiques sur des infrastructures de l'accès l'eau potable des villages. Au niveau de la région, 1 PSE supporte en moyenne au quotidien une sollicitation de 1030 habitants. À l'échelle des sous-préfectures, aucune ne respecte la norme qui est de 500 hbts/PSE. Toutefois, les sous-préfectures de Bonikro avec un ratio de 1PSE/587 hbts suivi de Djékanou 1PSE/606, sont proches de la norme. Les autres sous-préfectures restantes ont leurs PSE ayant des charges humaines allant jusqu'au double avec la sous-préfecture de Kpouèbo (1PSE/1375 hbts) comme pic. Cette situation découle du déficit de points d'eau face à la croissance démographique de la population rurale pour le responsable régional en charge de l'hydraulique. Cette situation pourrait également découler d'un manque de planification de la part des gestionnaires des ressources en eau. La figure 64 permet de mieux appréhender la distribution spatiale des niveaux de charge démographique par ouvrage dans ces départements.



**Figure 63 :** Distribution de la population par point de service d'eau

Il ressort de la lecture de la figure 64 relative à la distribution que toute la région est affectée par la situation de charge démographique assortie de variances très marquées. Les sous-préfectures de Kokoumbo et Djékanou ont des niveaux de charge démographique par point d'eau moderne le moins important. Par contre, Yamoussoukro, Kpouèbo et Attiéguakro sont

## RESULTATS ET DISCUSSION

les sous-préfectures dans lesquelles les ouvrages pour l'accès à l'eau potable subissent le plus de pression démographique. Cela est d'ailleurs lié à l'insuffisance accrue des PSE dans ces espaces. Sur le terrain, la forte sollicitation des infrastructures fonctionnelles ne permet toujours pas la satisfaction des attentes des communautés villageoises. Ces PSE connaissent un état de dégradation aboutissant à leur arrêt. Ils offrent donc à leurs bénéficiaires un service limité. Ainsi, les équipements hydrauliques des villages ont besoin d'être accrus pour une satisfaction des usagers.

### **8.3 Estimation des besoins en infrastructures d'AEP**

Afin d'être conforme au niveau de service imposé par la norme en Côte d'Ivoire, il importe donc de réaliser des points d'eau dans la totalité des zones rurales.

Le tableau XXX nous présente le nombre d'ouvrages hydrauliques à réaliser aux horizons 2027 et 2032. Les localités ayant une population de plus de 4000 habitants ou bénéficiant de l'Hydraulique Urbaine au cours de cette étude n'ont pas été pris en considération. A l'horizon 2032, les localités de N'zéré, Bonikro, Assakra et Suibiakro auront dépassé le cap de 4000 habitants. Ces contrées devront donc bénéficier d'ouvrages d'hydraulique urbaine. Quant aux autres localités les gestionnaires devraient accroître le taux d'ouvrages par la construction de bornes fontaines et de pompes à motricité humaine.

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau XXX:** Nombre d'ouvrages hydrauliques à réaliser aux horizons 2027 et 2032

Villages	Pop 2022	Nombre d'ouvrages existants		Pop 2027	Nombre d'ouvrages à réaliser en 2027		Pop 2030	Nombre d'ouvrages à réaliser en 2032	
		Nbre de BF	Nbre de		Nbre de BF	Nbre de		Nbre de BF	Nbre de
			PMH			PMH			PMH
ABAKRO	790	0	1	911	0	1	1051	0	0
ABLI-ALOUKRO	918	0	1	1059	2	0	1221	1	0
ABLI-BONIKRO	769	0	1	887	0	1	1024	0	0
ABOKOUAMÉKRO	1036	1	0	1196	2	0	1379	0	0
ABOUAKAKRO 1	1557	0	2	1797	3	0	2073	1	0
ABOUAKRO 2 - GROUDJI	1847	0	2	2131	5	0	2458	0	0
ABOUKRO	1365	0	2	1575	1	0	1817	0	0
ADAOU	1374	1	0	1585	2	0	1828	1	0
AGBAGNASSOU	223	0	1	257	0	0	297	0	0
AHONDO	415	0	1	479	0	0	553	0	1
AHOUÉKRO	1303	0	2	1504	3	0	1735	1	0
AKAKRO N'ZIKPRI	1233	0	2	1423	3	0	1642	2	0
AKAKRO-N'GBAN	2180	1	0	2514	5	0	2901	0	0
AKA-YAOKRO	939	0	1	1083	1	0	1250	1	0
AKIMOU-YAOKRO	2108	1	0	2432	4	0	2806	0	0
AKOUÉKOUADIOKRO	599	0	1	692	0	0	798	0	0
AKUNVIKRO	791	0	1	912	0	1	1052	0	1
ALLAI-YAOKRO	1267	0	2	1461	3	0	1686	1	0
ALLANGOUA	798	0	1	920	0	0	1062	1	0
ALLUIMINANKRO	2603	2	0	3003	4	0	3465	1	0
AMONKRO	1055	1	0	1218	2	0	1405	0	0

## RESULTATS ET DISCUSSION

ANGBAVIA	1242	0	3	1433	1		1653	2	0
ANGOSSÈ	1048	0	2	1209	3	0	1395	0	0
ANIKRO	592	0	1	683	0	1	788	0	0
ANOUMANGOUA	453	0	1	523	0	1	604	0	0
ASSAFOU	967	0	1	1116	2	0	1288	1	0
ASSAKRA	3233	3	0	3729	5		4302		
								HU	
ASSÉKOUAMÉKRO	1043	0	3	1204	2	0	1389	1	0
ASSINZÈ	1504	0	1	1735	3	0	2002	1	0
ASSOIKRO	506	0	1	583	0	1	673	0	0
ASSOUNVOUÈ	1669	1	3	1926	3	0	2221	1	0
ATTRÉNOU	1282	1	2	1479	2	0	1706	1	0
BENDRESSOU	1302	0	2	1502	3	0	1733	1	0
BÉRIABOUKRO	1422	1	2	1641	2	0	1893	1	0
BEZRO	656	0	1	757	0	1	874	0	0
BLÉ	300	0	1	346	0	0	400	0	0
BOFRÉBO	653	0	1	753	0	1	869	0	0
BONIKRO	3165	5	0	3651	3		4212		
								HU	
BONZI	2294	3	0	2646	3	0	3052	1	0
BRINGAKRO	1990	1	0	2295	4	0	2648	1	0
COMÉKRO	265	0	1	305	0	0	352	0	0
DIDA-BLÉ	2126	3	3	2453	2	0	2830	1	0
DIDA-KOUADIOKRO	1944	0	2	2243	5	0	2588	1	0
DIDA-N'GLOSSOU	969	0	1	1118	1	0	1289	3	0
DIDA-YAOKRO	1629	2	0	1879	1	0	2168	2	0
DIÉKÈKRO	551	0	1	635	0	1	733	0	0
DJAHAN-SAKASSOU	1733	1	0	2000	3	0	2307	1	0
DJAMALABO	2533	2	0	2923	4		3372	1	0

## RESULTATS ET DISCUSSION

DJANGOMÉNOU	926	0	1	1068	2	0	1232	1	0
DOUGBA	231	0	1	267	0	0	308	0	0
DOUGOUNOUKOUADIOKRO	2183	1	0	2519	4	0	2906	1	0
FASSOU	519	0	1	598	0	1	690	0	0
FONDI	725	0	1	837	0	1	965	0	0
GBAKROUKRO	520	0	1	600	0	1	692	0	0
GBOFIA	1223	1	0	1411	2	0	1627	1	0
GBOHUA	1759	2	0	2030	2	0	2342	1	0
GBONTI	947	0	1	1093	2	0	1261	1	0
GOFABO	1440	1	2	1661	3	0	1916	0	0
GOGOKRO	2482	1	0	2864	4	0	3304	2	0
GOUROMINANKRO	1890	0	5	2180	4	0	2515	1	0
KACOU-BROUKRO	934	0	1	1078	2	0	1243	1	0
KADJOKRO	620	0	1	715	1	0	825	0	0
KAHANKRO	2878	1	0	3320	6	0	3830	1	0
KALÉKOUA	984	0	1	1135	3	0	1310	0	0
KOFFIDJÈKRO	1166	0	2	1345	3	0	1552	1	0
KOIMOI-DIBIKRO	356	0	1	411	0	0	474	0	0
KONAN KOKORÉKRO	2039	3	0	2353	2	0	2714	1	0
KONAN-KOFFIKRO	1998	0	3	2305	5	0	2659	1	0
KONDOKRO	277	0	1	319	0	0	368	0	0
KORIAKRO	1723	0	1	1987	4	0	2293	1	0
KOUAMÉ-BONOU	478	0	1	552	0	1	637	0	0
KPLESSOU	1430	0	2	1650	3	0	1904	1	0
KPOUSSOUSSOU	2256	1	0	2602	4	0	3002	1	0
LABOKRO	1975	1	0	2279	4	0	2629	1	0
LAHOURÉBO	394	0	1	455	0	1	525	0	1
LALIÈKRO	1369	1	0	1579	3	0	1822	0	0

## RESULTATS ET DISCUSSION

LANGOSSOU	751	0	1	867	0	1	1000	1	0
LOGBAKRO	2264	1	0	2612	5	0	3013	1	0
LOMO-NORD	829	0	1	956	0	1	1103	1	0
LOMO-SUD	443	0	1	511	0	1	589	0	0
LOUKOU-YAOKRO	953	0	1	1100	1	0	1269	2	0
MAHOUNOU - AKOUE	2418	2	0	2790	3	0	3218	1	0
MAHOUNOU-NANAFOUÉ	2238	2	0	2582	4	0	2978	0	0
MAKANKOUAMÉKRO	753	0	1	868	0	1	1002	1	0
M'BOUESSOU	1528	0	2	1763	3	0	2033	1	0
MÉNOU	1011	0	1	1167	3	0	1346	0	0
MOROKINKRO	1106	0	1	1276	3	0	1473	0	0
MOUGNAN	2556	1	0	2949	5	0	3402	1	0
MOUGOKRO	535	0	1	618	0	1	713	0	0
NANAN	2151	1	0	2482			2863		
N'DA KONANKRO	1192	0	1	1375	3	0	1586	1	0
N'DA KOUASSIKRO	981	0	1	1131	2	0	1305	0	0
N'DAKRO	1394	0	1	1608	3	0	1855	1	0
N'DÈBO	2422	0	1	2794	6	0	3223	1	0
N'DÈNOU	1041	0	2	1201	3	0	1386	0	0
N'DOUKAHAKRO	1440	0	1	1661	4	0	1916	0	0
N'GATTAKRO	1885	0	2	2175	5	0	2509	0	0
N'GBÉKRO	1929	1	0	2225	4	0	2567	1	0
N'GBODO - N'GUESSANKRO	692	0	1	798	0	1	921	0	0
N'GUESSANBAKRO	2089	2	0	2410	3	0	2781	1	0
N'GUESSANKRO	749	0	1	864	0	1	997	0	0
NIAMKEY KONANKRO	1461	0	2	1686	3	0	1945	1	0
N'KLOÏDJO	446	0	1	515	0	1	594	0	0
N'ZABONOU	250	0	1	289	0	0	333	0	0

## RESULTATS ET DISCUSSION

N'ZÉRÉ	3145	3	0	3628	4		4185		
								HU	
OKO	469	0	1	541	0	1	624	0	0
OUAOUAKRO	1280	0	1	1476	3	0	1703	1	0
OUFFOUÉDIEKRO	2777	2	0	3203	5	0	3696	1	0
OUSSOU	1011	0	1	1167	2	0	1346	1	0
PÊ-KOUASSIKRO	414	0	1	478	0	0	551	0	1
POKOUKRO	446	0	1	515	0	1	594	0	0
SAHABO	2710	1	0	3127			3607		
SAKASSOU	880	0	1	1015	1	0	1171	2	0
SÉRÉMÉ	916	1	0	1057	2		1220	1	0
SUBIAKRO	3415	2	0	3940	6		4546	HU	
SUIBONOU	1641	1	1	1893	4	0	2184	1	0
TAFISSOU	2654	1	0	3062	5		3533	1	0
TENIKRO	1268	1	0	1463	3	0	1687	0	0
TOKORÉ-YAOKRO	228	0	1	263	0	0	303	0	0
TOLLAKRO	1566	1	0	1806	3	0	2084	1	0
TONTONOU	636	0	1	734	0	1	847	0	0
TONTONOU-KOFFIKRO	451	0	1	520	0	1	600	0	0
TOTO-KOUASSIKRO	1244	0	2	1435	3	0	1656	1	0
YAOKOUADIOKRO	626	0	1	722	0	1	833	0	0
YOBOUÉBO	673	0	1	777	0	1	896	0	0
YOBOUEBO - GLELISSOU	2406	1	0	2776	5	0	3203	1	0
YOBOUÉKRO	835	0	1	963	0	1	1111	1	0
YOBOUÉKRO	1106	0	1	1276	3	0	1473	0	0
ZAHAKRO	1115	0	1	1286	3	0	1484	0	0
ZOUGOUNOU	2011	1	0	2320	4	0	2676	1	0
ZOUGOUSSI	1135	0	1	1309	3	0	1511	0	0

## RESULTATS ET DISCUSSION

Le tableau XXXI présente la planification par année de la réalisation des ouvrages d'AEP dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi jusqu'à l'horizon 2030.

**Tableau XXXI:** Planification de la réalisation des ouvrages d'AEP jusqu'à l'horizon 2032

Sous-préfecture	2027		2032	
	PHM	BF	PHM	BF
ANGONDA	2	11	2	6
ATTIEGOUAKRO	0	20	1	2
BONIKRO	0	9	0	2
DJEKANOU	4	21	0	7
KOKOUMBO	3	29	3	12
KOSSOU	0	34	0	5
LOLOBO	2	42	0	6
PKOUEBO	0	29	0	7
TOUMODI	0	29	4	11
YAMOOUSSOUKRO	4	36	0	10
Total	11	260	7	68

A l'horizon 2027 et 2032 les bornes fontaines seront plus adaptées aux besoins des populations dans toutes les sous-préfectures. A ces périodes, on devrait avoir une forte croissance démographique qui ne pourrait plus être satisfaite par les pompes à motricité humaine. L'ordre croissant des besoins par sous-préfecture se présentera comme suit, Lolobo, Yamoussoukro, Kossou, Kokoumbo, Kpouebo, Toumodi, Djekanou, Attiegouakro, Angonda et Bonikro.

### Discussion

Ce diagnostic demeure un outil d'aide à la décision, à l'action pour le planificateur. Le SIG offre donc la possibilité de disposer de données historiques et actualisées sur la qualité de la ressource, sa disponibilité, sa gestion et permet de les optimiser en se focalisant sur la cartographie. La question de l'accès aux ressources en eau est abordée pour tous à travers le regard porté aux infrastructures pour veiller à la qualité de leur distribution. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude en ce qui concerne l'utilité et le rôle joué par le SIG dans le domaine hydraulique sont semblables à ceux de Garouani *et al.* (2006). Ces auteurs, ont visé dans leur travail un objectif fondamental qui est basé sur l'amélioration des connaissances nationales sur les ressources en eau et de leur protection. Dans notre contexte actuel, le SIG a joué un rôle capital. Il a permis d'avoir une idée sur la typologie de ces infrastructures et de leur répartition sur l'ensemble du territoire. Une étude similaire avait été réalisée par Hounguevou *et al* (2013) dans la localité de Zè au Bénin. En effet, à travers une approche SIG pour une

## RESULTATS ET DISCUSSION

analyse spatiale des infrastructures hydrauliques, ces auteurs ont utilisé l'analyse de proximité en se basant sur les zones tampons (buffer) afin d'apprécier la distribution spatiale et de déterminer la zone de desserte des points d'eau. En conclusion, ils ont montré une inégale répartition des infrastructures sur le territoire de la commune. La méthode utilisée pour ce travail est différente de celle basée sur le polygone de Thiessen qui est aussi un outil qui permet d'identifier les zones déficitaires de ces infrastructures hydrauliques et à assurer la distribution pour le bonheur de la population bénéficiaire (Hounguevou, 2013). Cette étude révèle une bonne couverture géographique en service d'eau potable du milieu rural de Yamoussoukro et Angonda. Il demeure similaire au niveau de couverture spatiale dans la région de l'Agneby-Tiassa où les localités rurales disposent d'une installation hydraulique (Koukougnon *et al.*, 2020). Ce niveau de dotation en hydraulique humaine découle des interventions du pouvoir public aidé par des partenaires au développement, des collectivités territoriales, des actions du Conseil Café-Cacao (Yao *et al.*, 2016). Par ailleurs, les résultats indiquent que l'excellent niveau de couverture géographique et de fonctionnalité en hydraulique rurale ne garantit pas pour autant l'accès durable des usagers à la ressource en eau potable. Si les normes nationales d'implantation d'infrastructures et équipements de l'accès à l'eau en milieu rural sont connues, leur niveau de respect reste préoccupant eu égard à la forte pression démographique supportée. Ainsi, les systèmes d'hydraulique humaine fournissant l'eau potable dans les localités étudiées sont en situation de quasi-inadéquation (52,3%). En outre, les points d'eau moderne en état de fonctionnement supportent au quotidien en moyenne une forte charge démographique (1030 habitants) là où la norme nationale recommande 500 habitants. Cette charge va souvent au double dans certaines contrées. Cette situation reste similaire aux travaux de Karidioula *et al* (2019) sur l'accès à l'eau dans les villages du département de Dabakala (Centre-nord de la Côte d'Ivoire). À cet effet, ils révèlent que le nombre d'usagers par pompe à motricité humaine fonctionnelle est plus élevé dans les sous-préfectures de Boniérédougou (1 132 hbts/HV) et de Niéméné (1101 hbts/HV). Par ailleurs, la surcharge démographique des points de service d'eau se retrouve, à quelques nuances près, dans les travaux de Hounguevou *et al.* (2014). Leurs travaux ont comme cadre d'étude des localités, de la commune de Kandi au Bénin. Il en ressort que dans ces localités chaque infrastructure hydraulique supporte en moyenne 2 500 habitants pour 250 habitants requis. L'inadéquation entre l'offre d'équipements et la population bénéficiaire est aussi corroborée par Touré & Koffi (2019) dans leurs travaux portant sur l'eau potable dans les villages de la région de Gbêkê (centre de la Côte d'Ivoire) selon une analyse statistique. Ils notent que les sous-préfectures de Bodokro, Sakassou et Ayaou-Sran ont un ratio de 600-700 habitants par pompe, tandis que ceux de Krofoinsou et de Diabo ont une situation

## RESULTATS ET DISCUSSION

plus préoccupante (plus de 700 hbts/pompe). Ainsi, la pression démographique subit par les équipements hydrauliques expose les villageois à des difficultés d'accès à l'eau du fait des longues files d'attente aux pompes. Le déficit d'investissement en infrastructures et équipements en eau potable dans le contexte de dynamique démographique rurale justifie la surcharge qui d'ailleurs dégrade plus les points de service d'eau existants comme le soutenaient Yao & Amani (2016) sur la pérennité du service public d'eau potable dans la sous-préfecture de Bondo (Nord-est de la Côte d'Ivoire).

### **Conclusion partielle**

L'optimisation de la desserte en eau potable dans les villages des départements de Yamoussoukro et Toumodi à consister à faire un état des lieux de la situation de desserte. Cela a permis d'identifier un total de 261 ouvrages de desserte exploitables, d'avoir une situation précise de l'accès à l'eau potable et du niveau de service d'eau dans ces départements. Il est ressorti d'innombrables disparités dans les taux de couvertures, certains villages dont le niveau de service non conforme aux normes devant passer à un niveau de service d'eau supérieur. En vue d'améliorer la situation de desserte dans ces départements, nous avons dressé une planification de réalisations, proposer des solutions d'amélioration. L'étude permet de passer à un taux de couverture satisfaisant d'ici 2032 conformément aux objectifs du développement durable. Cependant, une étude plus approfondie de chaque village devrait se faire car lorsqu'on prend chaque village individuellement, il ressort des inégalités d'accès par quartiers.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Ce sujet de thèse a été initié dans l'optique de trouver des solutions plus efficaces pour explorer, chercher et gérer les ressources en eau souterraine dans les départements de Yamoussoukro et Toumodi. Cela passe donc par la mise en place d'un outil d'aide à la décision pour une meilleure desserte en eau souterraine.

Cet outil a été réalisé de manière à compiler toutes les informations disponibles et facilement accessibles afin de démontrer son utilité dans la recherche et la gestion des ressources en eau souterraine.

La réalisation de cette base de données spatiales est basée sur la méthode MERISE et comprend la modélisation des données et la réalisation d'un prototype. La modélisation des données a permis de structurer la base de données. Celle-ci s'est faite en deux (2) principales étapes : la modélisation conceptuelle des données (MCD) et la modélisation logique des données (MLD). Le modèle conceptuel de données selon le formalisme Entité-Relation a été élaboré à partir du logiciel Sybase Power AMC 9.5. Ce formalisme utilise un langage graphique simple pour donner une description minutieuse des objets du monde réel et leurs liens structurels. Cette structure prend en compte les éléments suivants : les entités, les relations et les cardinalités. Les entités retenues pour la conception du MCD sont définies selon trois classes d'entités :

- entités sans dimension spatiale ou entités descriptives au nombre de neuf (9) : c'est l'exemple de l'entité « Paramètres hydrodynamiques » qui représente les caractéristiques qualitatives de l'aquifère ;
- entités à référence spatiale au nombre de quatre (4) : (Forage, village, sous-préfecture, département) ;
- objets cartographiques au nombre de quatre (4) : (extrait topographique, réseau routier, réseau hydrographique, MNT) nécessaire pour localiser les deux premiers types d'entités.

La réalisation du prototype, constituant la seconde étape, s'est effectuée en deux (2) étapes : l'implantation du modèle physique des données (MPD) et l'élaboration de requêtes. Les outils utilisés pour l'implantation du MPD sont le SGBD Microsoft Access, pour la création de toutes les tables descriptives et le logiciel ArcGIS pour la création de supports cartographiques et des tables à référence spatiale. Le regroupement de ces deux sources d'informations aboutit à la création d'une geodatabase.

L'exploitation du prototype à travers les traitements réalisés montre les capacités d'un tel outil dans la quête d'information sur les ressources en eau de ces départements.

Dans un premier temps, les requêtes effectuées ont permis de faire une analyse statistique et spatiale des paramètres de forages. Ces analyses ont mis en relief dans les

## CONCLUSION GENERALE

départements de Yamoussoukro et Toumodi des épaisseurs d'altération productives moins importantes, une profondeur optimale comprise entre 70 et 80 m pour de bon débit et des formations schisteuses plus productives. D'autre part, l'analyse géostatistique indique que la transmissivité, le coefficient d'emménagement, le débit spécifique, sont spatialement bien structurés et s'identifient à des variables régionalisées. Les cartes de prédiction ainsi obtenues, constituent un outil de décision important dans la recherche des eaux souterraines

Par ailleurs, la carte des zones favorables à la réalisation de forages économiques a permis de mettre en évidence quatre classes de faisabilité de forages manuels. 3,84% de cette zone n'est pas favorable aux forages économiques. La majorité des surfaces occupées par cette classe se trouve dans des zones montagneuses, notamment dans les sous-préfectures d'Angonda, d'Attiegouakro Kokoumbo et dans le Sud de Kossou. Les zones partiellement favorables occupent 28,26% de la superficie d'étude. Elles sont principalement dans les sous-préfectures de Yamoussoukro, Attiegouakro et Angonda. Quant aux zones favorables et très favorables, elles couvrent une surface de 67,9% réparties sur toute la zone d'étude.

Enfin, l'analyse de la couverture spatiale des forages dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi indique une bonne couverture dans les sous-préfectures de Yamoussoukro et Angonda ; une couverture moyenne dans les sous-préfectures de Djekanou, Toumodi, Attiegouakro et Lolobo et une couverture beaucoup plus faible dans les sous-préfectures de Kpouébo, Kokoumbo et Kossou. Cette distribution permet de combler les zones déficitaires en cas de campagne d'installation de nouveaux forages. Près de 3/4 des villages de 1 000 à 4 000 habitants ont un service d'eau assuré par le système en HV. Dix-sept (17) villages de plus de 4 000 habitants ne disposent pas de système d'Hydraulique Urbaine (HU) et 52,3% des villages équipés sont desservis par des systèmes non adéquats. Dans cette zone, 1 PSE supporte en moyenne au quotidien une sollicitation de 1030 habitants. Aucune sous-préfecture ne respecte la norme qui est de 500 hbts/PSE. Toutefois, les sous-préfectures de Bonikro avec un ratio de 1PSE/587 hbts suivi de Djékanou 1PSE/606, sont proches de la norme. Les autres sous-préfectures restantes ont leurs PSE ayant des charges humaines allant jusqu'au double avec la sous-préfecture de Kpouébo (1PSE/1375 hbts). A l'horizon 2032 les bornes fontaines seront plus adaptées aux besoins des populations dans toutes les sous-préfectures. L'ordre des besoins par sous-préfecture sera, Lolobo, Kossou, Yamoussoukro, Toumodi, Pkouebo, Kokoumbo, Djekanou, Attiegouakro, Angonda et Bonikro.

## CONCLUSION GENERALE

### **Recommandations**

Le Système d'Information à Référence Spatiale développé, est avant tout, un outil de communication de l'information et doit devenir pour les gestionnaires des ressources en eau, un outil du quotidien leur permettant d'alléger certaines tâches.

Notre étude vise à conduire à une prise de conscience de tous sur l'opportunité qu'offrent les nouvelles technologies de l'information et de la communication dans la planification et la gestion des ressources en eau. Cette recommandation concerne tant bien la communauté scientifique que les décideurs. L'auto-suffisance en eau potable ainsi que le bien-être des populations passe d'une part, par la volonté politique et d'autre part, par une approche scientifique. Cette approche scientifique doit être soutenue par les bailleurs de fonds et les élus locaux pour permettre une série d'étude sur le développement des outils d'aide à la décision.

Il est également recommandé à la Direction de l'Hydraulique rurale d'effectuer des réhabilitations de forages car de nombreux PMH des départements de Yamoussoukro et de Toumodi sont vieillissantes avec pour effet direct un grand nombre de forages non fonctionnels ou à faible débit.

Enfin, renforcer la formation et l'encadrement des différents acteurs dans la gestion du service public d'eau dans les départements de Yamoussoukro et de Toumodi.

### **Perspectives**

Les éléments de la base de données, avec des améliorations, pourraient être facilement introduits dans le réseau Internet et constitués une voie d'accès aux données. L'ensemble des données serait ainsi rassemblé dans une même structure, ce qui constituerait un atout pour les structures qui travaillent dans la prospection des eaux souterraines. Les différents gestionnaires du territoire pourront alors insérer des données et rechercher des informations depuis leur ordinateur personnel.

Le phénomène de changement climatique, dont la conséquence entraîne des diminutions de débits de forages est un phénomène de plus en plus crucial. Il faut donc Modéliser le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de départements de Yamoussoukro et de Toumodi..

## **REFERENCES**

## REFERENCES

- Aho A.V., Beeri C. & Ullman J.D. (1979). The information preserving properties of relational database transformations. *Revue des sciences de l'eau*, 24(1) : 9-22.
- Ahoussi K.E. (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville, Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 270p.
- Aïssata B.H. (2010). Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger), Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université d'Abdou Moumouni (Niamey, Niger), 220p.
- Akmeel J.M. (2013). Étude de faisabilité de la mise en place du réseau d'information économique du tourisme pour la ville de Yamoussoukro. Mémoire d'Ingénieur des Techniques du Tourisme, Ecole de Formation Continue et de Perfectionnement des Cadres de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 23 p.
- Alassane A. (2004). Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (sud du Benin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal), 185p.
- Anonyme. (2014). Ministère d'Etats, Ministère du Plan et du développement. Abidjan (Côte d'Ivoire), 137 p.
- Arnaud M., Emery X., Fouquet C., Brouwers M. & Fortier M. (2000). L'analyse krigéante pour le classement d'observations spatiales et multivariées. *Revue statistiques appliquées*, 49 : 15-27.
- Ba F., Bouchard C., & Abi-zeid I. (2011). Analyse multicritère pour la priorisation des interventions en matière d'approvisionnement en eau en milieu rural au Sénégal : cas de la région de Diourbel. *Revue des sciences de l'eau*, 24(1) : 9-22.
- Badard T. (1996). Quad trees : a data structure for retrieval on composite keys. *Acta Informatica*, 4(1) : 1 - 9.
- Bahir M., Carreira P., Oliveira D.M. & Fernandes P. (2008). Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, 64(1) : 11-13.

## REFERENCES

- Baillargeon G. (2005). Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de la Faculté des sciences et de génie, Université de Laval, (Québec, Canada), 76 p.
- Baka D, Gnamba F.M, Yao K.T. & Youan Ta M. (2019). Influence des caractéristiques de l'aquifère sur la productivité des forages dans la région d'Oumé (centre-ouest côte d'Ivoire). *Asian Journal of Science and Technology*, 10(8) : 15-17.
- Baka D. (2006). Caractérisation des propriétés hydrauliques des réservoirs fissurés du département d'Oumé Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire DEA, UFR STRM, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 84 p.
- Baka D., Lasm T., Oga M.S., Yao K.T., Youan Ta M., Lasme O.Z., Onetié Z.O. & Fossou N.M.R. (2012). Relation entre la densité surfacique de fractures et le débit spécifique dans la région d'Oumé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue CAMES-Série A*, 13(2) : 13-23
- Baka D., Lasm T., Oga M.S., Youan Ta M., Kouakou O.S. & Ettien B.F. (2011). Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Center of Côte d'Ivoire). *American journal of scientific and industrial research*, 2 : 10-22.
- Baklouti M. (2008). Elaboration d'un plan d'action pour la gestion intégrée du littoral nord de la ville de Sfax. Mémoire de Master de la faculté des sciences. Université de Sfax, Tunisie, 48 p.
- Bard J.P. (1974) Les grands accidents du craton ouest-Africain en Côte d'Ivoire, des décrochements post-éburnéens. *Mémoire ORSTOM*, 50, Paris (France) : 1863-1868.
- Berger J., Camerlo J., Fahy J.C. & Haubert M. (1980). Etude des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). *Bull. BRGM*, section III, Paris (France) : 273 - 291.
- Biemi J. (1992). Contribution a l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Marahoué (Cote d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 479 p.
- Biscaldi R. (1968). Problème hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical. *Bulletin BRGM*, 2è Série, Section III, 2 : 7-22.
- Boker E. (2003). Développement d'une base de données hydrogéologiques liée aux forages en milieu fissuré et analyse géospatiale par systèmes d'information géographique.

## REFERENCES

- Certificat de spécialisation en géomatique 3<sup>e</sup> cycle. Centre universitaire d'écologie (Genève, Suisse), 50 p.
- Bonache A., Maurice J. & Moris K. (2010). Détection de fraudes et loi de Benford : quelques risques associés. *Revue Française de Comptabilité*, 431 : 2-5.
- Bonn F. & Rochon G. (1992). Précis de télédétection : Principe et méthodes. Press. Université Quedec. AUPELF-UREF, 1 : 485 p.
- Bosser P. (2013). Introduction à l'interpolation spatiale et aux géostatistiques. Université Larbi Ben M'hidi, Faculté des sciences de la terre et d'Architecture, département de géographie et d'aménagement du territoire (Alger, Algérie), 90 p.
- Bouaziz S., Riahi E., Rebai N. & Ben H. (2005). Élaboration d'une base de données Hydrogéologiques pour la région de Gabès. *IX<sup>ème</sup> Journées de la Géologie tunisienne*, 28-30 septembre 2005, Tunis, Tunisie, pp 13-22.
- Caillez F. & Pages J.P. (1976). Introduction à l'analyse des données. *SMASH*, Paris, (France), 616 p.
- Carlos C., Steven M. & Peter R. (2012). Database Systems: Design, Implementation, and Management, Cengage, 11(3) : 23-34
- Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod édition, Bordas, Paris (France), 236 p.
- Chandoul E.R. (2019). Élaboration d'une base de données hydrogéologiques pour la région de GABÈS « BDHYDGABES ». *Journal of Environmental Management*, 56 : 97–118.
- Cheikh H.K. (2007). Etude sur l'optimisation du coût des forages en Afrique de l'Ouest. Rapport Sénégal, 80 p.
- Ci-énergies (2020). Projet de construction d'une file 225 kv Taabo - Yamoussoukro - Kossou - Bouake 2. Rapport final, étude d'impact environnemental et social, 328 p.
- Codd E.F. (1970). A relational model for large shared data banks. *Proceedings of the ACM*, 13(6) : 17-27.
- Cooper H.H. & Jacob C.E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Transactions of the American Geophysical Union*, 27(4) : 16-24.
- Cooper S., Dann W., & Pausch R.A. (2000). Tool for introductory programming concepts. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 15 : 10-16.
- CPCS. (1967). Classification des sols, travaux de la commission de Pédologie et de cartographie des sols. *Laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA*. Paris (France), 87 p.

## REFERENCES

- CTB (2009). Enjeux et perspectives de la gestion de l'eau potable en milieu rural. Expérience de la coopération belge dans le domaine de l'hydraulique rurale et périurbaine en Afrique. Contribution au programme Hydraulique International, PHI-II Projet D.4.6.7 Panel, Bruxelles, 154 p.
- Davide R. (1991). A database tool-kit for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3 : 11-21.
- De Marsily G. (1981). Flow and transport in fractured rocks. Connectivity and scale effect. In *Hydrogeology of Rocks of Low Permeability*, *International Association Hydrogeology*, 17 : 17-21.
- Debard S. (2005). Réalisation d'un système d'information de gestion de base de données et d'information géographique dédié à la surveillance de l'herbier de Posidonies en méditerranée. Mémoire de Master 2, SIG et gestion de l'espace. Université Jean Monnet, (St Etienne, France), 100 p.
- Delany F. (1965) Mission hydrogéologique des régions à substratum schisteux (Côte d'Ivoire). Rapport de mission SODEMI, Côte d'Ivoire, 46 p.
- Delhomme J.P. (1978). Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Doctorat, Université de Pierre Marie Curie (Paris, France), 176p.
- DHH (2001). Bilan diagnostic et redynamisation du dispositif de maintenance des pompes manuelles. Séminaire de réflexion sur la maintenance des pompes d'hydraulique villageoise, 47 p.
- Dibi B. (2008). Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (Sud-est de la Côte d'Ivoire) : Apport du SIG et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 164p.
- Dibi B., Inza D., Goula B.T.A., Savane I. & Biémi J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristalloydique dans la région d'Aboisso (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences et Technologies*, 13 : 12-17.
- Dibi B., Inza D., N'go Y. & Gone D.L. (2005). Origine et mécanisme de la minéralisation des eaux souterraines de la région de Dabou, Côte d'Ivoire. Apport de l'Analyse en Composantes Principales Normées. *Revue internationale des Sciences de la Vie et de la Terre*, 5(1) : 5-16.
- Direction de l'hydraulique humaine (DHH) (2006). L'hydraulique humaine en Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire), 22 p

## REFERENCES

- Djro S.C. (1998). Evolution tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma. Thèse de Doctorat en géologie, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 171 p.
- Douagui A.G., Kouadio S.K.A., Mangoua O.M.J., Kouassi A.K., Kouame´ B.K. & Savané I. (2019). Using specific capacity for assessing of the factors controlling borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of N'Zi, Iffou and Moronou regions in the eastern area of côte d'Ivoire, *groundwater for sustainable development*, 9 : 100-235.
- Dovonou F.E., Alladassivo E.M., Koukpo J.M., Sintondji L. & Yalo N. (2022). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau du lac Azili dans la commune de Zangnanado au centre du Bénin. *International Journal Biological and Chemical Sciences*, 16(2) : 867-877.
- Eau Vive (2012). Plan Communal de Développement Sectoriel Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement de Saponé, Burkina Faso. *Journal of Water Science*, 3(2) : 12-21.
- Ehoussou K.M., Kouassi A.M. & Kamagaté. B. (2019). Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du bélier, centre de la Côte d'Ivoire. *Revue ivoire sciences technologie*, 3 : 7-16.
- El morjani Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels. *Conférence francophone*, 17-22 Juin 2003, Souss, Maroc, pp 76-103.
- Faillat J.P. (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat en hydrogéologie, Université Languedoc (Montpellier, France), 534 p.
- Fossou A. (2010). Contribution hydrogéologique à l'étude des aquifères discontinus du département de Ferkessédougou pour une meilleure alimentation en eau potable. Mémoire DEA, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 69 p.
- Garouani A. & Merzouk A. (2006). Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection . *Revue des sciences de l'eau*, (19) 1 : 1-10.
- Georges G. (2003). Bases de données. *Edition eyrolles*, Paris (France), 234 p.
- Gnamba F.M., Oga Y.M.S., Gngangne T., Lasm T., Biémi J. & Kouakou Y.K.N. (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région

## REFERENCES

- de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 10(5) : 18-23
- Gnazalé G.G.R. (2020). Apport de la géomatique à l'analyse et à la modélisation de l'impact des facteurs climatiques et environnementaux sur la prolifération des schistosomes en Côte d'Ivoire : cas de la schistosomiase urinaire, dans la région du bélier et du district de Yamoussoukro. Thèse de doctorat en climat, environnement et développement durable, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 215 p.
- Gombert P. (1997). Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale. *Hard Rock Hydro*, 241 : 13-15.
- Guerin-Villaubreuil G. (1962). Hydrogéologie en Côte d'Ivoire. Mémoires du BRGM, 20, Paris (France), 43 p.
- Hamed B.D. (2018). Developpement and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296 : 1–22
- Himiyari S.M. Hoepffner C., Benzakour M. & Hadani D.E. (2002). Etude structurale du haut atlas oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de Spot. *Téledétection*, 2 : 4-12.
- Hounguevou S.C.G. (2013). Utilisation du SIG dans l'accessibilité des populations aux infrastructures hydrauliques dans la commune de Zè. Mémoire de DESS en SIG au RECTAS, Obafemi Awolowo University (Ilé-Ifè, Nigeria), 65 p.
- Hounguevou S.C.G., Tohozin C. A. B. & Soumah M. (2013). Approche SIG pour une analyse spatiale des infrastructures hydrauliques dans la commune de Zè, Benin. *Journal of Applied Biosciences*, 73 : 5949– 5958.
- Hounguevou S.C.G., Tohozin C.A.B., Soumah M. & Toko M.I. (2014). SIG et distribution spatiale des infrastructures hydrauliques dans la commune de Zè au Bénin. *Afrique sciences*, 10(4) : 14-16.
- INS (2021). Récensement générale de la population et de l'habitat, Côte d'Ivoire, Rapport final de l'institut national de la statistique, 37 p.
- Jarar O.H. (2009). Un système d'information géospatiale pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines, Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Rabat, Maroc), 234 p.
- Jones M.R., Singels A, & Ruane E. (2013). Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. *African Sugar Technologys Association*, 86 : 3-11.

## REFERENCES

- Jourda J.P., Kouamè K.J., Saley M.B., Eba L.E., Anani A.T. & Biémi J. (2015). Détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation de forages manuels à partir d'analyse multicritère et d'un SIG : cas de la Côte d'Ivoire. *Journal of Water Science*, 28(2) : 11-13.
- Jourda J.R.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'Etat ès-Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430p.
- Karidioula L. & Assi-Kaudjhis N. B (2019). Contraintes et précarités dans l'accès à l'eau potable dans le département de Dabakala (Côte d'Ivoire) » *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 6(3) : 6-15.
- Koffi K. (2004). Contribution à l'étude des processus couplés hydrogéochemiques dans les stocks de déchets miniers : le cas du site de Carnoules (Gard, France). Thèse de Doctorat en hydrogéochemie, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 161 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 en hydrogéologie, Université Montpellier II (Montpellier, France), 235p.
- Kolling M. (1999). The problem of teaching object-oriented programming. *Journal of Object Oriented Programming*, 11(8) : 8-15.
- Konan A.S. (2018). Côte d'Ivoire : Le gouvernement face à une vaste pénurie d'eau courante dans le nord du pays. Rapport Jeuneafrique, 14 p. <http://www.jeuneafrique.com/>.
- Konan-Waidhet A.B. (2007). Conception d'une base de données spatiales en vue d'une gestion intégrée des ressources du territoire par la méthode merise. Cas de la région du Denguelé (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Télédétection et SIG, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 141 p.
- Konan-Waidhet A.B., Kouadio K.E., Dibi B., Gabriel E., Ake G.A. & Savané I. (2010). Contribution à la création d'une base de données spatiale pour la gestion des forages en milieu fissuré : cas du Denguelé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal Biological and Chemical Sciences*, 4(6) : 6-14.

## REFERENCES

- Kouadio E.K., Nagnin S. & Savane I. (2010). Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : application à la région du Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 23(1) : 1-15.
- Kouadio K.E. (2005). Stratégie de prospection des nappes de fissures par analyse spatiale du potentiel de productivité et optimisation de la profondeur des forages. Cas du Denguélé (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat unique en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 181 p.
- Kouame K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 194 p.
- Kouamé K.I. (2007). Pollution physico-chimique des eaux dans la zone de la décharge d'Akouédo et analyse du risque de contamination de la nappe d'Abidjan par un modèle de simulation des écoulements et du transport des polluants République de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en hydrochimie, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 205 p.
- Kouamelan A.N. (1996). Géochronologie et Géochimie des formations archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéenprotérozoïque. Thèse de Doctorat en géologie, Université de Rennes 1 (Rennes, France), 284 p
- Kouassi A.M., Coulibaly D., Koffi Y.B. & Biémi J. (2013). Application de méthodes géophysiques à l'étude de la productivité des forages d'eau en milieu cristallin : cas de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 16(2) : 12-16.
- Koudou A., Assoma T.V., Adiaffi B., Youan-Ta M., Kouame K.F. & Lasm T. (2014). Analyses statistique et geostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie asar envisat du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 20 : 14-16
- Kougbo M.D. (2015). Évaluation des ouvrages hydrauliques ruraux en Côte d'Ivoire : expérience du projet Pham dans la sous-préfecture de Bouaflé (Région de la Marahoué). Mémoire de Master professionnelle en sciences et gestion de l'environnement, UFR Géosciences de l'Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 45p.

## REFERENCES

- Koukougnon W.G & Guede C.M. (2020). Analyse de l'état du service d'hydraulique rurale dans la région de l'agneby tiassa (sud de la Côte d'Ivoire). *GéoVision, Revue du Laboratoire Africain de Démographie et des Dynamiques Spatiales*, 7(2) : 2707-0395.
- Krige D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*, 13(7) : 45-61
- 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(12) : 14-17
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Poitiers (Poitiers, France), 274 p.
- Lasm T., Lasme O., Oga M.S., Youan-Ta M., Baka D., Kouamé K.F. & Yao K.T. (2008). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pédro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2) : 4-16.
- Leblond P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). Thèse de 3ème cycle en hydrogéologie, Université de Bordeaux (Bordeaux, France), 150 p.
- Lebreton. (2000). Mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour le bassin du Merguelil (Tunisie). Mission IRD, Tunis dans Monat F. rapport de stage DESS, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier (Montpellier, France), 103 p.
- Leflem M.M. (2013). Conception d'une base de données cartographique de la ressource en eau souterraine, réalisation des cartes thématiques : cas de Libreville centre, Gabon. Mémoire de Master en SIG. Université des 2IE (Ouagadougou, Burkina Faso), 113p
- Loba A.D. (2013). Évaluation quantitative du niveau d'équipement des localités rurales : essai de modélisation. Application au département d'Alépé, Côte d'Ivoire. *In geotrope*, 1(3) : 11-18.
- Mangoua J.M. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 199 p.

## REFERENCES

- Mangoua M.J., Toure S, Goula B.T.A. & Yao K.B. (2010). Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 16(2) : 3-10.
- Maréchal J.C., Dewandel B. & Subrahmanyak 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*, 4(7) : 1-17.
- Massoud H. (1988). Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique. *Document BRGM*, Paris (France), 197 p.
- Matheron G. (1970). La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique. Fontainebleau (France), 614 p.
- Meave M., Méhu J. & Laforest V. (2012). Evaluation multicritère de la performance des technologies de traitement des sédiments pollués par les PCB. *Colloque Eau, Déchets et Développement Durable E3D*, 17-20 Mars 2012, Agadir, Maroc, pp 159-267
- Meijerink A.M., De-brouwer H.A.M., Mannerts C.M. & Valenzuela C. R. (1994). Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. *Journal ITC-UNESCO*, 23(3) : 19-21.
- Meylan P. (1986). Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage : application à la pluviométrie. *Hydrologie Continentale*, 12(1) : 10-15
- Ministère de l'Hydraulique (2020). Disponible à <http://hydraulique.gouv.ci/> consulté le 30 Juin 2022.
- Missoumi A. & Tadjerouni K. (2003). Apport des SIG dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts à Rabat (Maroc). *Revue du Centre Royal de Télédétection Spatiale*, 2 : 13-15.
- Muller P.A. (1998). Modélisation Objet avec UML. *Édition Eyrolles*, Paris (France), 245 p.
- N'go Y.A., Lasm T., Koita M. & Savane I. (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 9(1) : 13-17.
- 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<sup>ème</sup> cycle en hydrogéologie, Université de Franche-Comté (Besançon, France), 154 p
- N'guessan K.A., Kouassi A.M., Gnaboa R., Traoré K.S. & Houenou P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé : cas de la ville de Yamoussoukro (centre de la Côte d'ivoire), *Larhyss Journal*, 23 : 11-15.

## REFERENCES

- Niamké K.H., Saley M.B., N'Dri B.E., Ouattara A. & Biemi J. (2008). Contribution à l'interprétation des linéaments par l'exploitation des Pseudo Images, de l'hydrographie en région tropicale humide : Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 24(1) : 7-9.
- OCDE (2011). La gouvernance de l'eau dans les pays de l'OCDE : Une approche pluri-niveaux. Rapport final OCDE, 77 p. <http://dx.doi.org/10.1787/97892616824-fr>.
- OCDE (2017). Comment faire en sorte que les données favorisent le développement. Rapport 2017/ Data for Développement, Paris, 123 p.
- Oga M.S. (1998). Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Approches hydrochimique et isotopique. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Paris XI (Orsay, France), 308 p.
- ONU. (2013). Objectifs du Millénaire pour le développement. Ouagadougou.
- Oula J.M. (2011). Evaluation et analyse géostatistique des paramètres hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (centre-est de la Côte d'Ivoire). Rapport de projet de fin d'études, INP-HB (Côte d'Ivoire), 79p.
- Pouliot J., Rognon N. & Goley F. (1997). De la sélection à la mise en œuvre d'outils de conception pour les SIRS. *Bulletin Sécheresse*, Nice (France), 7 p.
- Razack M. & Lasm T. (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325 : 6-17.
- Razack M. & Lasm T. (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325 : 11-14.
- Razack M. (1984). Application des méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie, Thèse de Doctorat d'Etat en hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques Languedoc (Languedoc, France), 384 p
- Renault C. (2003). Analyse multicritère : Etude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie (Montréal, Canada), *Scientific Series*, 5(1) : 12-16.
- Rentier (2002). Méthode Stochastique de délimitation des zones de protection au tour des captages d'eau, Thèse de Doctorat, Université de Liège (Lège, France), 224p.
- Rissanen J. (1999). Theory of Relations for Databases. A Tutorial Survey, 7th Symposium on Math. Foundations of Computer Science. *Springer*, 64 : 5-11.

## REFERENCES

- Rochefeld A. & Morejon J. (1989). MERISE. Mémentos-eo. Les éditions d'organisation. Dans *BENAGLI C. (1998) : Conception d'un SIRS environnemental pour la gestion des réserves naturelles des grangettes*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 88 p. <http://lasig.rpfl.ch/recherche/rapport/cb>. Consulté en mai 2006.
- 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 en télédétection et SIG, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 209 p.
- Savane I & Biemi J. (2010). Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 16 : 2-13.
- Savane I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord Ouest de la Cote d'Ivoire) : apport de la 168 télédétection et d'un système d'information hydrogéologique a référence spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences Naturelles, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398p.
- Sawadogo N.A. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, (Grenoble, France), 340 p.
- SMBO (2010). Syndicat Mixte du Bassin de l'Or. Inventaire géoréférencé et diagnostic des ouvrages hydrauliques. Study report-Amara Mining Côte d'Ivoire SARL / Cabinet AMEC Foster Wheeler / Cabinet 2D Consulting Afrique, 99 p.
- Soro G. (2010). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines dans la region des lacs (centre de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, UFR des Sciences de la Terre de l'Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 295 p.
- Soro G., Soro N., Ahoussi K.E., Lasm T., Kouamé F.K., Soro T.D., & Biémi J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 2(16), 1-16.
- Soro G., Soro T.D., Fossou N.M-R., Adjiri O.A. & Soro N. (2019). Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal Biological and Chemical Sciences*, 13(3) : 11-18.

## REFERENCES

- Soro N. (2002) : Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 256p.
- Sorokoby V.M., Saley M.B., Kouame K.F., Djagoua M.E.V., Bernier M., Affian K. & Biemi J. (2010). Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Téledétection*, 9(4) : 10-15.
- Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat 3ème cycle en hydrogéologie, Université de Lausanne (Lausanne, Suisse), 302 p
- Tohozon C.A.B., Attolou S.B., Guedegbé O.D. & Agbo F. (2014). Une approche SIG pour la restructuration du Sud-Ouest de la ville de Porto-Novo, Bénin. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 23 : 12-16.
- Toure S. & Koffi Y.J. (2019). La durabilité sociale" contrariée par l'insuffisance d'eau potable dans les villages de la région de Gbêkê (centre de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 6 : 5-12.
- Toure S. (2007). Pétrologie et géochronologie du massif de granitoïdes de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) : Evolution magmatique et contexte géodynamique au protérozoïque inférieur (Paléoprotérozoïque) ; relation avec les formations volcaniques et volcanodétritiques du Zanzan, Koun, Tanda ; implications paléogéographiques. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 467p.
- UNICEF (2009). Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République du Togo. Étude réalisée en collaboration avec la Direction générale de l'eau et de l'assainissement du Ministère de l'eau. Rapport Partica Foundation, Enterprise Works/ VITA, 59 p.
- UNICEF (2010a). Feasibility study for manual drilling mapping of favorable zones in Republic of Liberia. Foundation, Enterprise Works/VITA, 27 p.
- UNICEF (2010b). Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République du Sénégal. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 45 p.

## REFERENCES

- UNICEF (2010c). Étude de faisabilité des forages manuels : identification des zones potentiellement favorables de la République Centrafricaine. Partica Foundation, Enterprise Works/VITA, 30 p.
- UNICEF (2010d). Étude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables de la République du Mali. Rapport Partica Foundation, 26 p
- Vouillamoz J.M. (2003). La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par Résonance Magnétique Protonique. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, (Paris, France), 315 p.
- WWAP (2019). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : Ne laisser personne pour compte, Paris, UNESCO,197p.
- Yacé I. (1976). Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de FETTEKRO en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 373 p.
- Yace I. (1984). Le précambrien de l'Afrique de l'Ouest et ses corrélations avec le Brésil oriental. Rapport final du projet PICG, 28 p.
- Yameogo D. (1988). Hydrogéologie des formations de fissures de la partie sud du plateau Mossi entre le Nazino et le Nakambé (Région de Kombissiri-Manga : Burkina-Faso). Thèse de Doctorat 3ème cycle en hydrogéologie, Université scientifique, technologique et médicale de Grenoble (Grenoble, France), 165 p.
- 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 en hydrogéologie, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yao D., Delor C., Gadou G., Kohou P., Okou A., Konate S. & Diaby I. (1995). Notice explicative de la carte géologique feuille de Dimbokro. *Journal of Environmental Hydrology*, 18 : 1-15.
- Yao K.A. & Amani Y.C. (2016). La problématique de la pérennité du service public d'eau potable à Bondo (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Perspectives & Sociétés*, 3(2) : 6- 9.
- Youan Ta M., Lasm T., Jourda J.P, Kouamé K.F. & Razack M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), *Revue Télédétection*, 8 : 3-12.

## REFERENCES

- 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 unique en hydrogéologie et SIG, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 236 p.
- Youan Ta M., Baka D., Lasm T., Jourda J.P. & Biemi J. (2015). Analyse des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère fissuré du socle paléo protérozoïque : Aide à l'approvisionnement en eau potable des populations de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13 : 561-580.
- Younes A. (2008). Reliability-based design and maintenance optimization of structures. Thèse de doctorat en hydrogéologie, Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, France), 159 p.

## PUBLICATIONS

### PUBLICATIONS

Kokobou K .H.J., Konan-Waidhet A.B. & Soro T.D. (2022). Design of a spatial information system for the management of drinking water supply boreholes in the departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Cote d'Ivoire). *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 3 : 3 - 289.

Kokobou K.H.J., Konan-Waidhet., A.B., Soro., T.D. & Biemi J. (2022). Mapping of Potential Recharge Areas of Fractured Aquifers in the Departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Côte d'Ivoire). *Journal of GeographicInformation System*, 14 : 527-545.

## RESUME

### RESUME

Le besoin d'assurer une gestion rationnelle et durable de l'alimentation en eau potable dans les zones rurales des départements de Yamoussoukro et de Toumodi a été largement accentué ces dernières années. L'objectif de cette étude est de développer un outil d'aide à la décision pour une bonne gestion de la desserte en eau des populations dans ces zones. La méthodologie mise en place a reposé sur le couplage de la base de données relationnelle et l'analyse géospatiale sous SIG à partir d'une geodatabase. Ainsi, la Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise ou (MERISE) a servi de base pour la réalisation du modèle conceptuel des données à travers le formalisme Entité-Relation; la méthode d'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et l'approche géostatistique pour l'analyse de la productivité de l'aquifère ; la méthode d'analyse multicritères pour la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages économiques et le polygone de Thiessen pour la mise en évidence du poids spatial de chaque forage, l'état du service d'hydraulique villageoise et l'optimisation de la desserte en eau potable dans la zone d'étude. Comme résultat, le modèle conceptuel des données créé contient quatre (4) objets cartographiques, quatre entités à référence spatiale et neuf (9) entités non spatiales ou descriptives. La transformation du modèle conceptuel en modèle logique relationnel a abouti à l'implémentation de la geodatabase, validé par la réalisation des requêtes. L'analyse statistique indique que, les profondeurs optimales des forages sont comprises entre 60 m et 90 m, les premières arrivées d'eau sont les plus productives. La transmissivité varie de  $3,01.10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s à  $6,69.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Les transmissivités sont plus élevées dans les schistes (52,2%). Le débit spécifique calculé varie de 0,01 à 0,9 m<sup>3</sup>/h/m. Les données de coefficient d'emmagasinement de forage sont comprises entre  $2,9.10^{-8}$  et  $4,66.10^{-4}$ . L'ACPN a mis en évidence des corrélations entre le débit moyen, l'épaisseur d'altération, la transmissivité et le débit spécifique. Selon l'analyse géostatistique la transmissivité, le coefficient d'emmagasinement et le débit spécifique se comportent comme des variables régionalisées. Enfin, il ressort que plus de 67,9% de la zones d'étude est favorable à l'implantation de forages économiques. Les systèmes d'hydrauliques humaine fournissant l'eau potable dans les localités rurales sont en situation de quasi-inadéquation (52,3%) avec les besoins de la population. Ainsi, environ trois cent quarante (340) ouvrages devront être réalisés à l'horizon 2030 pour répondre aux besoins des populations.

**Mots clés :** Gestion rationnelle et durable, MERISE, Geodatabase, forages économiques, géostatistique, Yamoussoukro et Toumodi

### ABSTRACT

The need to ensure rational and sustainable management of the drinking water supply in the rural areas of the departments of Yamoussoukro and Toumodi has been greatly accentuated in recent years. The objective of this study is to develop a decision support tool for good management of water supply to populations in these areas. The methodology implemented was based on the coupling of the relational database and geospatial analysis under GIS from a geodatabase. Thus, the Method of Study and Computer Realization for Enterprise Systems or (MERISE) served as a basis for the realization of the conceptual model of the data through the Entity-Relation formalism; the Standardized Principal Component Analysis (ACPN) method and the geostatistical approach for the analysis of aquifer productivity; the multi-criteria analysis method for mapping areas favorable to the establishment of economic boreholes and the Thiessen polygon for highlighting the spatial weight of each borehole, the state of the village water supply service and the optimization of drinking water supply in the study area. As a result, the conceptual data model created contains four (4) cartographic objects, four spatially referenced entities and nine (9) nonspatial or descriptive entities. The transformation of the conceptual model into a logical relational model resulted in the implementation of the geodatabase, validated by the realization of queries. The statistical analysis indicates that, the optimal depths of the boreholes are between 60 m and 90 m, the first arrivals of water are the most productive. The transmissivity varies from  $3.01.10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s to  $6.69.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Transmissivities are higher in shales (52.2%). The calculated specific flow varies from 0.01 to 0.9 m<sup>3</sup>/h/m. Borehole storage coefficient data is between  $2.9.10^{-8}$  and  $4.66.10^{-4}$ . The ACPN has highlighted correlations between the average flow, the thickness of alteration, the transmissivity and the specific flow. According to the geostatistical analysis, the transmissivity, the storage coefficient and the specific flow behave as regionalized variables. Finally, it appears that more than 67.9% of the study area is favorable to the establishment of economic boreholes. The human hydraulic systems supplying drinking water in rural localities are in a situation of near inadequacy (52.3%) with the needs of the population. Thus, approximately three hundred and forty (340) works will have to be completed by 2030 to meet the needs of the populations.

**Key words :** Rational and sustainable management, MERISE, Geodatabase, economic drilling, geostatistics, Yamoussoukro and Toumodi

# Mapping of Potential Recharge Areas of Fractured Aquifers in the Departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Côte d'Ivoire)

Kouassi Hervé Jacques Kokobou<sup>1</sup>, Arthur Brice Konan-Waidhet<sup>1\*</sup>,  
Tanina Drissa Soro<sup>1</sup>, Jean Biemi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Science and Technology of Environment, Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR STRM/Felix Houphouët Boigny University, Abidjan, Côte d'Ivoire

Email: \*konanwab@yahoo.fr, \*konanwaidhet@ujlg.edu.ci

**How to cite this paper:** Kokobou, K.H.J., Konan-Waidhet, A.B., Soro, T.D. and Biemi, J. (2022) Mapping of Potential Recharge Areas of Fractured Aquifers in the Departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Côte d'Ivoire). *Journal of Geographic Information System*, 14, 527-545.

<https://doi.org/10.4236/jgis.2022.145030>

**Received:** August 27, 2022

**Accepted:** October 21, 2022

**Published:** October 24, 2022

Copyright © 2022 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Groundwater is an important natural resource for all human activity. Today, due to climate change and population growth, the demand has increased considerably, thus requiring their evaluation to ensure sustainability. However, one of the important but difficult to estimate parameters due to its variability is the recharge. This work aims to map the potential recharge of aquifers in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. Saaty's AHP (Analytical Hierarchy Process) multi-criteria analysis technique was used by integrating different thematic layers. First, a reclassification then weighting of these parameters was made according to their influence in the recharge process. Finally, they were integrated into a GIS to produce the map of potential groundwater recharge zones. The results indicate that the potential high recharge areas represent approximately 43.11% of the area of the study area. These areas appear scattered in the sub-prefecture of Yamoussoukro, Kokoumbo Attiegouakro, Toumodi et Kpouèbo.

## Keywords

Groundwater, Recharge, Multi-Criteria Analysis, GIS, Cote d'Ivoire

## 1. Introduction

Water is a very important resource at the center of sustainable development. It is essential for socio-economic development, ecosystem health, and human survival. However, this resource is becoming increasingly scarce [1]. Many countries in

the world are faced with problems of drinking water supply and Côte d'Ivoire, a country located in West Africa, does not escape this situation. Indeed, while the needs are increasing, the supply is decreasing and therefore not very satisfactory. Thus, for several years, the exploitation of groundwater captured in the basement in Côte d'Ivoire has experienced a considerable boom, thousands of boreholes have been built and operated in almost all areas of the country, having difficulties in accessing drinking water [2]. Thus, for a sustainable management and perpetuation of this resource, it is necessary to know and evaluate the recharge, the flows and the discharge which constitute the fundamental elements of a hydrosystem [3]. Among these elements, recharge would be one of the current major concerns of the scientific community and decision makers in that it conditions the proper renewal and protection of groundwater resources [4].

Thus, in order to establish an optimal and rational management of groundwater resources, water managers need very precise information on the conditions of recharge and exploitation of groundwater. According to [5], the assessment of groundwater recharge is undoubtedly one of the most relevant parameters but also the most difficult to estimate. For this purpose, a wide range of techniques has been considered. These are the climatic method [6]; the physical method [7]; the geochemical method [8]. Despite all these approaches, the determination of recharge is still today unreliable [4] and expensive [9]. Therefore, it seems necessary to apply other techniques that could reduce uncertainties in order to increase confidence in recharge estimates.

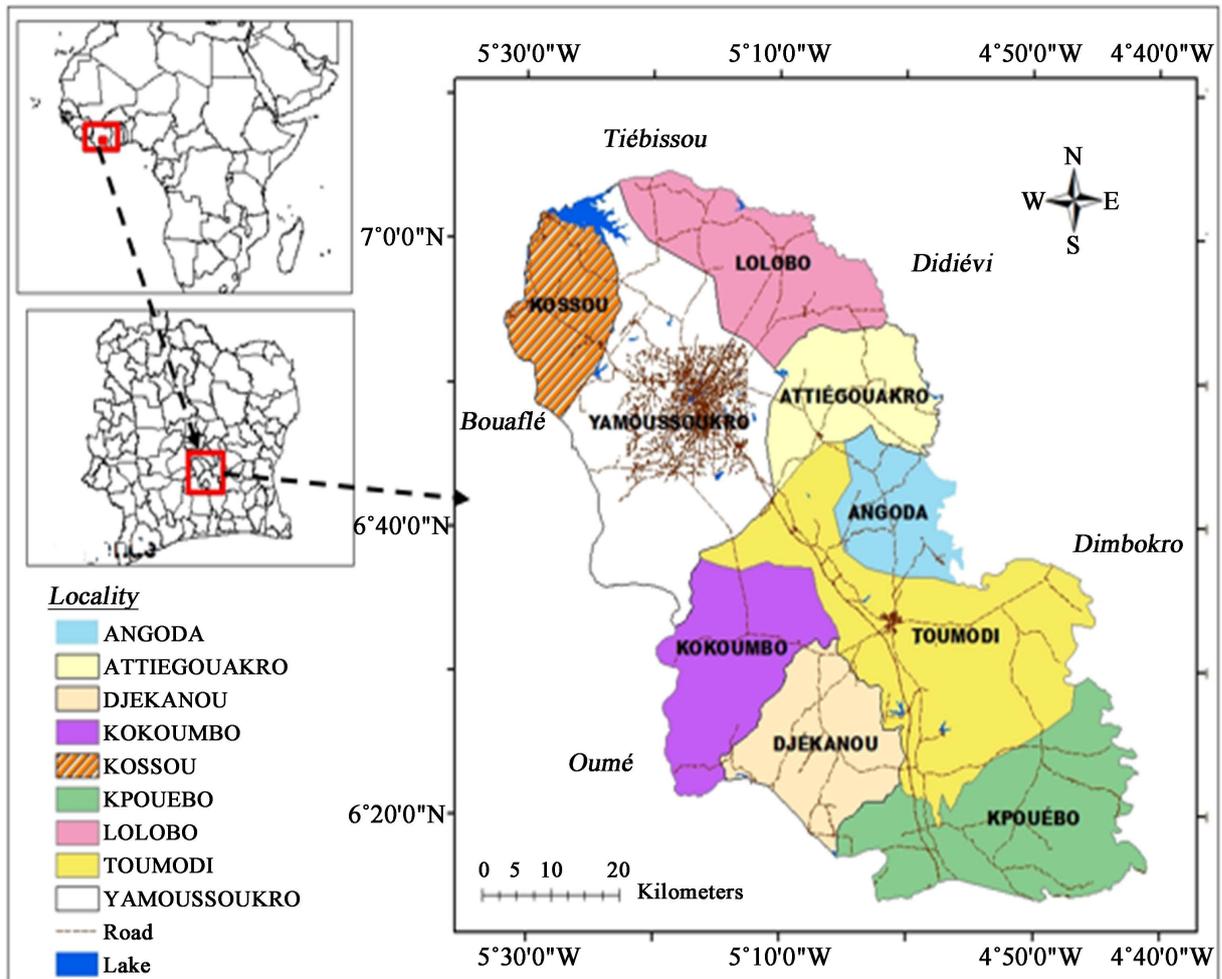
The objective assigned to this work is therefore to map the potential recharge areas of the Yamoussoukro and Toumodi aquifer using remote sensing and geographic information systems (GIS). To provide assistance to decision makers and managers, GIS is considered one of the best tools to both gather all data, analyze them and visualize several layers of information on the same medium. The methodological approach of this study is based on the classification and combination of the different parameters that influence recharge.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Study Area

The study was conducted in central Côte d'Ivoire, in the departments of Yamoussoukro and Toumodi, located between latitudes 6°20'N and 7°00'N and longitudes 4°40'W and 5°30'W (**Figure 1**). These departments include the sub-prefectures of Kossou, Lolobo, Attiegouakro, Kokoumbo, Djekanou, and Kpouebo. This area covers an area of 4.789.38 km<sup>2</sup>.

The relief of the departments of Yamoussoukro and Toumodi is not very hilly and corresponds to the plateaus of the wooded savannah zone. The entire area is relatively uneven, marked by the presence of chains of hills with a granitic structure. The average altitude in these departments is 200 m [2]. The climate of the region is tropical humid and characterized by two seasons. Divided between a rainy season (March to November), and a dry season (December to February).



**Figure 1.** Location of the study area.

The average annual rainfall is 1148 mm/year while the average temperature is 30°C. The hydrographic network in these departments is marked by the remarkable presence of the Bandama River, the N'zi and Kan rivers and their tributaries. They also have many artificial and natural lakes, including Lake Kossou, on which the Kossou hydroelectric dam was built. Their vegetation belongs to the Guinean domain and is dominated by the pre-forest savannah (transition zone between the southern forest and the northern savannah) dotted more or less densely with small trees and interspersed with copses and forest islands. Forest galleries occupy the lowlands along the watercourses. On the drained sandy soils, stands of rôniers and palm trees appear in tall grasslands [10]. Geologically, the rocks encountered in these departments are generally granitoids, green rocks, volcano-sedimentary rocks and shales [11]. These geological formations are characterized by the presence of schistosity, fractures, and large quartz veins [12], which would favor infiltration and therefore groundwater recharge. The aquifer system of Yamoussoukro and Toumodi is consistent with that generally encountered in the basement environment of tropical zones. There are both alterite and fractured reservoirs.

## 2.2. Materials

The working material consists of software (ArcGIS 10.4 and ENVI 4.5) and satellite data. The land cover and fracture network maps are produced with ENVI 4.5 software from Landsat 7 satellite scenes 197-053; 197-054 acquired on 02 February 2018 and available from <http://earthexplorer.usgs.gov>. ArcGIS 10.4 was also used to extract the slope and drainage density map from the 30 m resolution Digital Terrain Model (DTM) available at <https://earthexplorer.usgs.gov> and finally, to integrate all the thematic maps used for this study.

## 2.3. Methods

After having identified all the parameters considered representative in the recharge of the aquifers, it is necessary to determine which of them will have more impact in the recharge process. For this purpose, one of the usual statistical methods has been considered. It is based on the multi-criteria analysis AHP (Analytic Hierarchy Process) of [13]. The principle consisted in studying each parameter separately according to their role in infiltration, and then a thematic map was established for each of them. Then, a classification was defined for each factor and a rating was assigned to each class, followed by an attribution of weight to the parameters according to their degree of involvement in the infiltration phenomenon. Finally, all the spatial information related to the different factors was crossed in a GIS.

The approach is the one that was adopted by other authors including [3] [4] [14]. The process is organized in five steps which are, identification of parameters, mapping of parameters, reclassification of parameters, weighting by multi-criteria analysis and finally determination of potential recharge areas.

### 2.3.1. Identification of the Parameters Defining Infiltration

Many works ([3] [4] [15] [16] [17]) indicate that a number of factors would contribute to the definition of potential regional-scale aquifer recharge areas in the basement zone. These include: land use types, fracture density, aquifer permeability, slope, and drainage density.

### 2.3.2. Parameter Mapping and Reclassification

#### 1) Fracture density mapping

The elaboration of the fracture density map started with the production of the lineament map. This is done by satellite image processing. In this work, the Landsat 7 satellite scene 197-053 and 197-054 images acquired on February 02, 2018 were used. As the image was already geometrically rectified and georeferenced at acquisition, the treatments performed were mainly summarized in two steps (enhancement and validation). The enhancement of the discontinuities was done by applying the directional filters of Sobel. Their use allowed to manually extract the lineaments and to elaborate the detailed lineament map. This map was validated using the borehole flow rates of the two departments. The validation consisted in assessing the proximity of large flow boreholes to major linea-

ments. The validated fracture map was processed to determine quantifiable parameters such as fracture density. The production of the fracture density map is done with ArcGIS 10.4 software. Different zones are then identified according to the cumulative length of fractures on  $5 \times 5 \text{ km}^2$  grids.

#### 2) Drainage density mapping

Drainage density is defined as the ratio of the total length of streams in a watershed to the area of the watershed [4]. The assessment of the hydrogeological properties of the drainage network was based on the characterization of density having a relationship with permeability. This map was developed by ArcGIS 10.4 software.

#### 3) Land use map

The land cover map of the departments of Yamoussoukro and Toumodi was produced from a Landsat 7 satellite image acquired in 2018. The maximum likelihood algorithm was chosen for the supervised classification. This method is commonly used in the literature [18] [19]. This method was used to select five land use classes in the area. These are the class “forest”; “degraded forest”; “crop and fallow”, “habitat and bare soil” and “water”.

#### 4) Slope mapping

The slopes are obtained from the DTM of Côte d’Ivoire from satellite images SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) of 30 m resolution. The slopes calculated with ArcGIS 10.4 software are expressed in degrees. They were grouped into four classes.

#### 5) Establishment of the permeability map or hydraulic conductivity of aquifers

The hydraulic conductivity was determined at the location of the boreholes that capture the fractures located in this area. This parameter expresses the capacity of a ground to let water pass through it. They were calculated considering the pumping tests. The deduction was made according to Equations (1) and (2).

$$T = Ke \quad (1)$$

$$K = T/e \quad (2)$$

with

K: hydraulic conductivity; T: transmissivity; e: thickness of the aquifer determined by the distance between the base and the top of the wells [20].

### 2.3.3. Reclassification of Parameters

The reclassification step consisted in assigning scores to the different classes of the selected parameters according to their degree of infiltration by defining intervals. This process makes it possible to standardize the parameters by defining the degree of membership of each criterion in a common interval of 1 to 10. Indeed, the strongly unfavorable class always has the lowest score contrary to the strongly favorable class which has the highest score. However, the choice of scores depends on the influence of the class on infiltration. The result of the reclassification of the identified criteria, whose combination favors the good recharge or

not of the groundwater is recorded in **Table 1**.

### 2.3.4. Determination of the Weights of the Parameters by the Multicriteria Analysis Method (AHP)

The decision criteria are weighted using the linear combination method based on the pairwise comparison technique according to the Analytical Hierarchy Process (AHP) of Saaty [13] improved and used by [4] [16]. It produces standardized weights whose procedure consists of comparing the relative importance of all elements belonging to the same level of the hierarchy taken two by two,

**Table 1.** Ratings assigned to recharge parameters ([4] [21]).

Groundwater recharge parameters	Qualitative criteria	Degree of infiltration	Odds
Drain density (DD) (km/km <sup>2</sup> )	<5	Very low	9
	5 - 10	low	7
	10 - 15	Medium	5
	15 - 20	High	3
	>20	Very high	1
Land use	Water	Very high	9
	Cultivation and fallow	High	7
	clear forest	Medium	5
	Dense forest	low	3
	Agglomerations and bare ground	Very low	1
Slope (Degree)	<4	Very low	9
	4 - 9	low	7
	9 - 16	Medium	5
	16 - 23	High	3
	>23	Very high	1
fracture density (Km/Km <sup>2</sup> )	<1	Very low	1
	1 - 5	low	3
	10 - 15	Medium	5
	15 - 20	High	7
	>20	Very high	9
Aquifer permeability (×10 <sup>-8</sup> m/s)	<3	Very low	1
	3 - 8	low	3
	10 - 15	Medium	5
	14 - 22	High	7
	>22	Very high	9

compared to the element of the level immediately above. This comparison was based on a numerical scale (Table 2).

Once all the combinations are made, it will be a question of deducing the eigenvector (Vp) (Equation (3)) and the weighting coefficient (Cp) (Equation (4)).

The principle of determination is as follows:

$$V_p = \sqrt[k]{W_1 \dots W_k} \tag{3}$$

With k = number of parameters compared; Wk = main values assigned to the variables;

$$C_p = \frac{V_p}{V_{p1} + \dots + V_{pk}} \tag{4}$$

The sum of the Cp of all the parameters of a square matrix must be equal to 1 (one). A high Cp, will tend to accentuate the recharge while a low Cp will reduce it. Table 3 summarizes the different binary combinations performed as well as the values of the corresponding eigenvectors and weighting coefficients.

In a study that relies on the subjectivity of values, it is imperative to determine the consistency of judgments [22]. Indeed, since the values assigned often present a certain degree of inconsistency, a synthesis of all the judgments proves wise. To verify the consistency of the judgments, [23] determined an assessment criterion which is the consistency ratio (CR). If this ratio is less than 10%, then the assessments are consistent; if it is more than 10%, they need to be revised. The verification principle is divided into several successive steps (Equations (5) to (11)):

- Normalization of the matrix [A]. It consists in dividing each element of a column by the sum of this column:

$$[A] = \sum \frac{W_n}{\sum W_n} \tag{5}$$

**Table 2.** Scale of evaluation of different parameters towards infiltration ([4] [16]).

Class	Very high	High	High to Medium	Medium	Medium to low	low	Very low
Odds	10	8	6.5	5	3.5	2	1

**Table 3.** Matrix of weighting factors.

Parameters	Df	K	P	DD	OS	Vp	Cp
Df	1	3	3	5	7	3.160	0.459
K	1/3	1	3	4	5	1.817	0.264
P	1/3	1/3	1	3	4	1.055	0.153
OS	1/5	1/4	1/3	1	3	0.548	0.080
DD	1/7	1/5	1/4	1/3	1	0.297	0.043
Sum	2	4.78	7.58	13.33	20	6.877	1.000

K: alteration permeability, OS: land use, P: slope, DD: drainage density, Df: fracture density.

- Computation of the priority vector [C]. It consists in calculating the average of each line:

$$[C] = [A] \times \frac{1}{n} \tag{6}$$

- Multiplying each note of the matrix by the corresponding priority vector allows to deduce the global priority [D].

$$[D] = \sum W_n \times [C] \tag{7}$$

- Division of each global priority by its corresponding priority vector to find the rational priority [E].

$$[E] = \frac{[D]}{[C]} \tag{8}$$

- Calculation of the average of the rational priorities Ymax.

$$Y_{\max} = \frac{[E]}{n} \tag{9}$$

- Calculation of the coherence index (IC).

$$IC = \frac{Y_{\max} - n}{n - 1} \tag{10}$$

- Deduction of the consistency coefficient (RC).

$$I_a = \frac{IC}{I_a} \tag{11}$$

where (Ia) is the random index. The values of (Ia) are recorded in **Table 4**.

### 2.3.5. Mapping of Potential Recharge Areas for the Yamoussoukro and Toumodi Aquifers

The computational method used in the GIS for overlaying the data is the operational approach of the single synthesis criterion of Roy in [22]. The principle is to sum the different layers according to their importance in groundwater recharge. The probability that the recharge in a zone is high is related to the values of the classes of parameters that intersect. In fact, it will depend on the index of the zones that favor recharge. Therefore, the calculation of the recharge index (Ir) is performed in GIS according to Equation (12).

$$I_r = 0.459[Df] + 0.264[K] + 0.153[P] + 0.080[OS] + 0.043[DD] \tag{12}$$

where Ir: is the sum of the weighted scores calculated for each pixel of the raster from the score of the five parameters.

The probability of recharge is related to the values of the classes of the crossed parameters. This depends on the index of recharge-promoting areas. Thus, [24] defined a method (Equation (13)) to help interpret the classes to which the

**Table 4.** Random index ([13]).

Number of variables	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ia	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

recharge class values relate.

$$I_{rp} = (P(I_{rmax} - I_{rmin}))/100 + I_{rmin} \quad (13)$$

With  $I_{rp}$  = recharge index in percentage;  $P$  = corresponds to a percentage class;  $I_{max}$  = maximum recharge index;  $I_{rmin}$  = minimum recharge index.

Following this same logic, the  $I_r$  recharge index values were interpreted (Equation (14)).

Since the weighting coefficient is fixed, the minimum rating that a parameter can have is 1 and the maximum rating is 10. Substituting the different values of maximum and minimum rating, the equation becomes (Equation (14)):

$$I_r = (P \times 6.2)/100 + 1 \quad (14)$$

All the operations performed to arrive at the mapping of potential recharge areas are grouped in the conceptual data model (Figure 2).

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Results

##### 3.1.1. Fracture Map

The detailed lineament field includes all lineaments surveyed (in total, 1718)

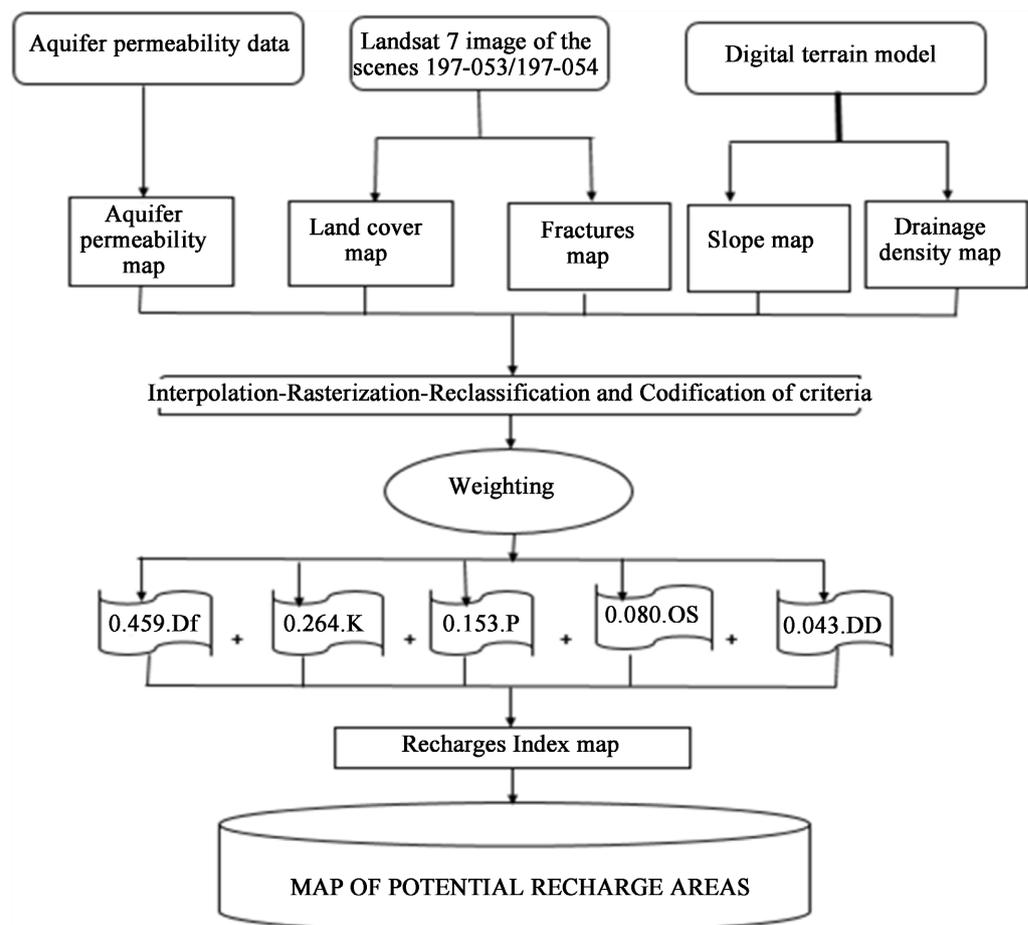


Figure 2. Conceptual data model.

during the manual extraction phase. The cumulative length of the lineaments is equal to 14.694 Km with an average of 2.6 Km over an area of 4.789 Km<sup>2</sup> (**Figure 3**).

L'exploitation de la carte détaillée des linéaments permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques à partir desquels sont définies et caractérisée la géométrie des aquifères souterrains (densité de fracturation, distribution des longueurs et des orientations des linéaments ...).

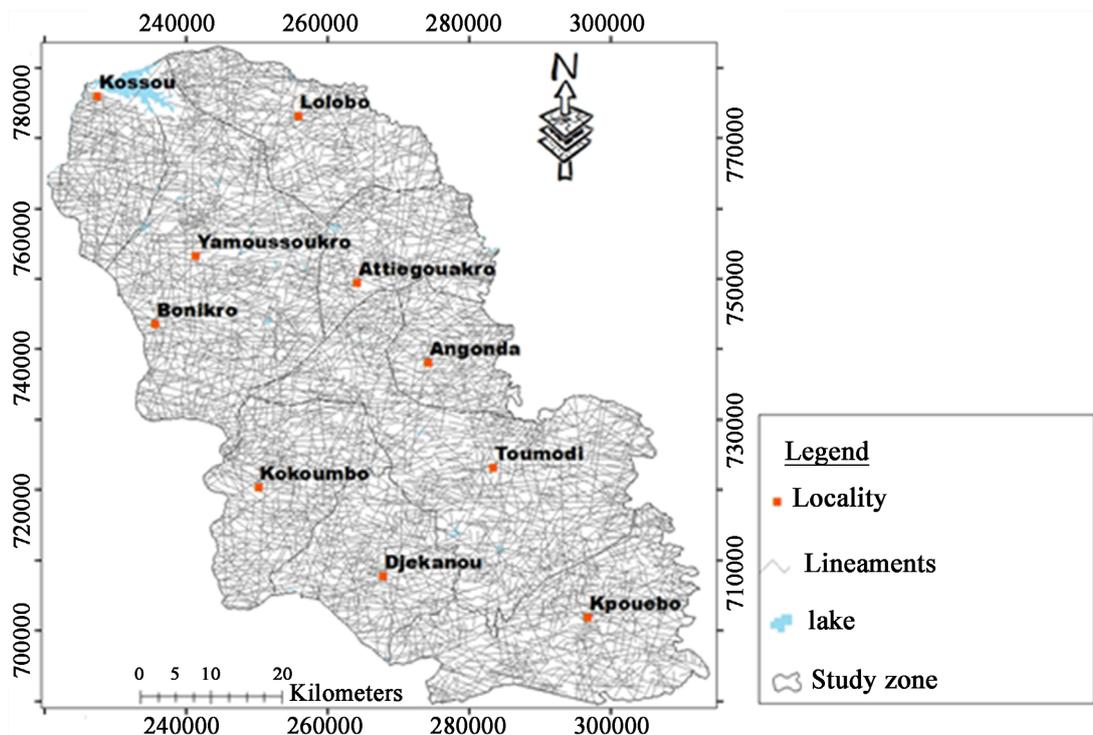
### 3.1.2. Fracture Density Map

In order to better observe the spatial distribution of fracture density according to the number of fractures per unit area, the iso value map of distribution of this parameter was constructed (**Figure 4**).

The density is variable over the whole area. The fractures are therefore distributed differently over the entire study area. A global analysis of this map shows that the departments of Yamoussoukro and Toumodi are strongly fractured and therefore favourable to infiltration. Indeed, the medium, strong and very strong classes represent about 70.5% of the study area. On the other hand, areas of low fracture density occupy about 29.5% of the study area. Nevertheless, it should be noted that the zones of very high fracturing density occupy about 8.5% of this area and seem to be distributed over the whole area.

### 3.1.3. Hydraulic Conductivity Map

Data interpolation showed that almost the entire area is covered by hydraulic conductivities with values between  $1.06 \times 10^{-7}$  and  $9.87 \times 10^{-4}$  m/s (**Figure 5**).



**Figure 3.** Map of the detailed lineament survey of the departments of Yamoussoukro and Toumodi.

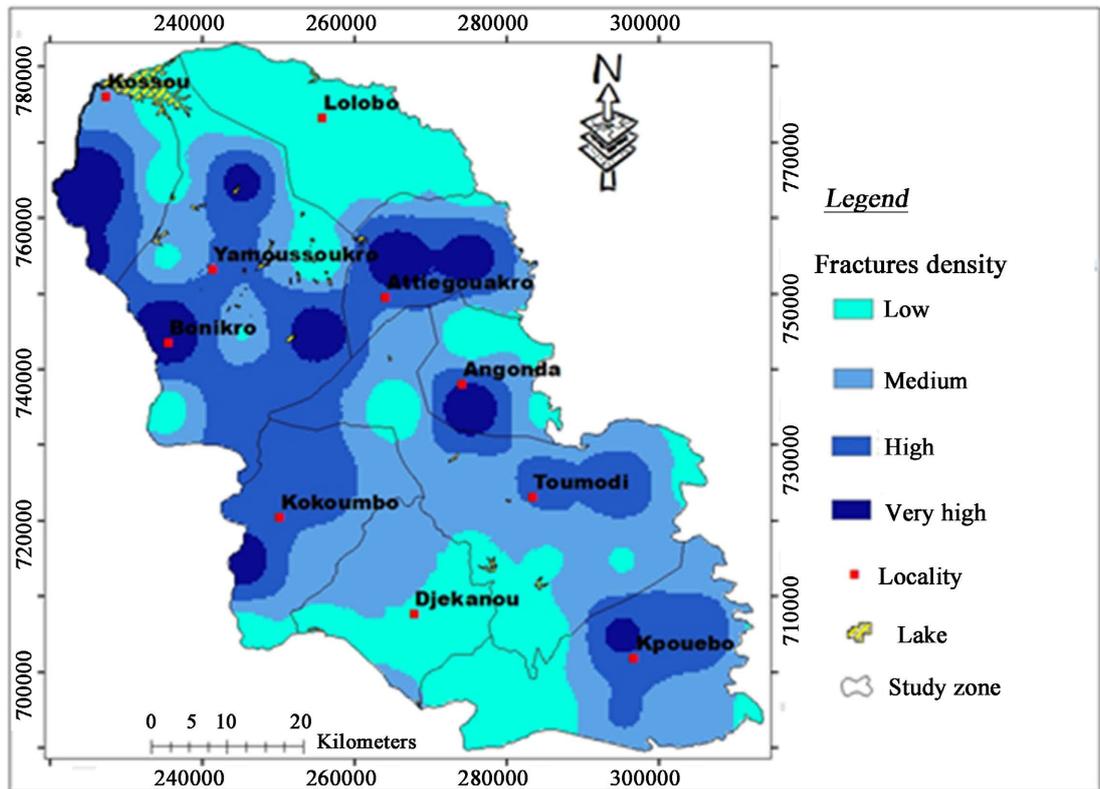


Figure 4. Fracture density map.

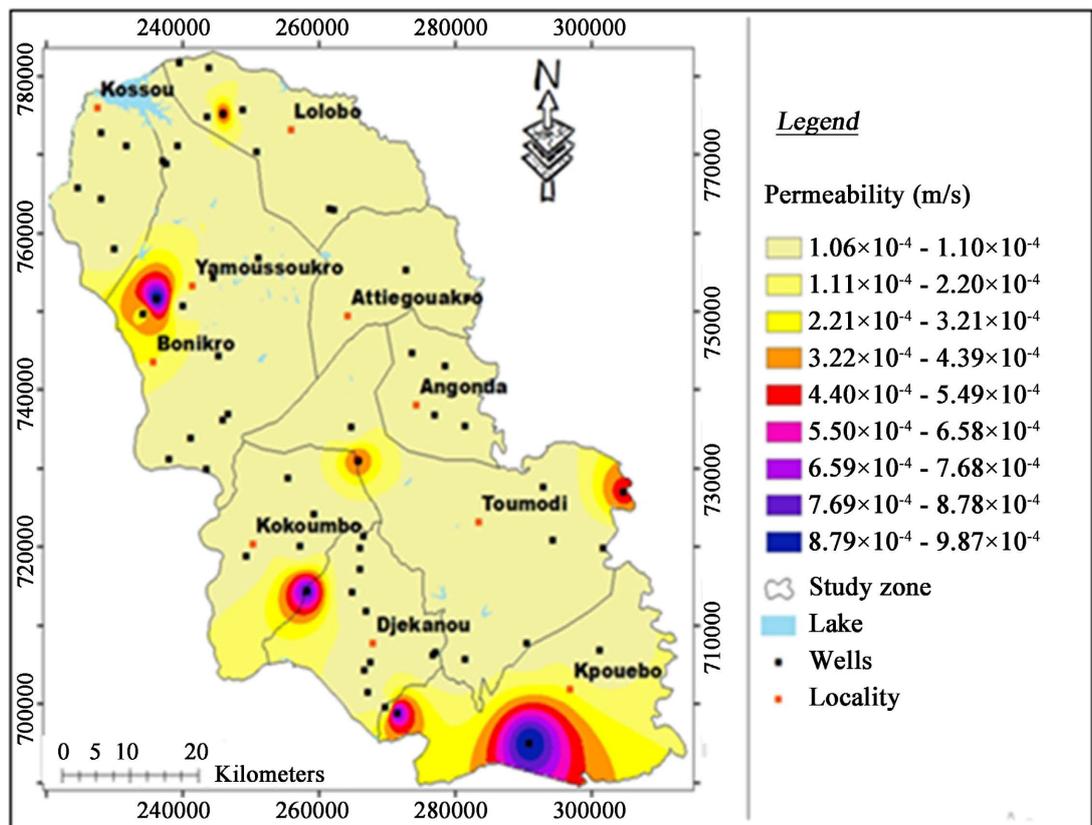


Figure 5. Map of hydraulic conductivity of the aquifer.

More than 80% of the area is covered by low conductivity. However, there are high values in the south in the Kpouebo sub-prefecture and a few sites scattered throughout the rest of the area.

### 3.1.4. Slope Map

The relief of the Yamoussoukro and Toumodi departments is relatively hilly. Structuring into four classes indicates that the spatial coverage is characterized by 33.5% low slope; 48.7% medium slope; 12.5% steep slope and 6.3% very steep slope (Figure 6). The steepest slopes are found in the sub-prefectures of Attiégouakro, Angonda and Kpouebo due to the existence of mountain ranges.

### 3.1.5. Land Use Map

The spatial distribution map of land use shows six (6) classes (Figure 7). The class Habitats and Bare Soil represents 5.7% of the study area, the forest islands constitute 26.1%, the degraded forest represents 23.7%, in addition the crops and fallow land occupy 43.6% while water represents 0.9%.

### 3.1.6. Drainage Density Map

The drainage density map shows (4) four surface classes (Figure 8). The low density class is 22.1%, the medium density class is 35.3% of the study area, the high density class is 25.4% and the very high density class is 17.2% of the area.

Table 5 presents the results of the judgment audit.

With an RC equal to 5.8%, the prioritization matrix presented (Table 5) is

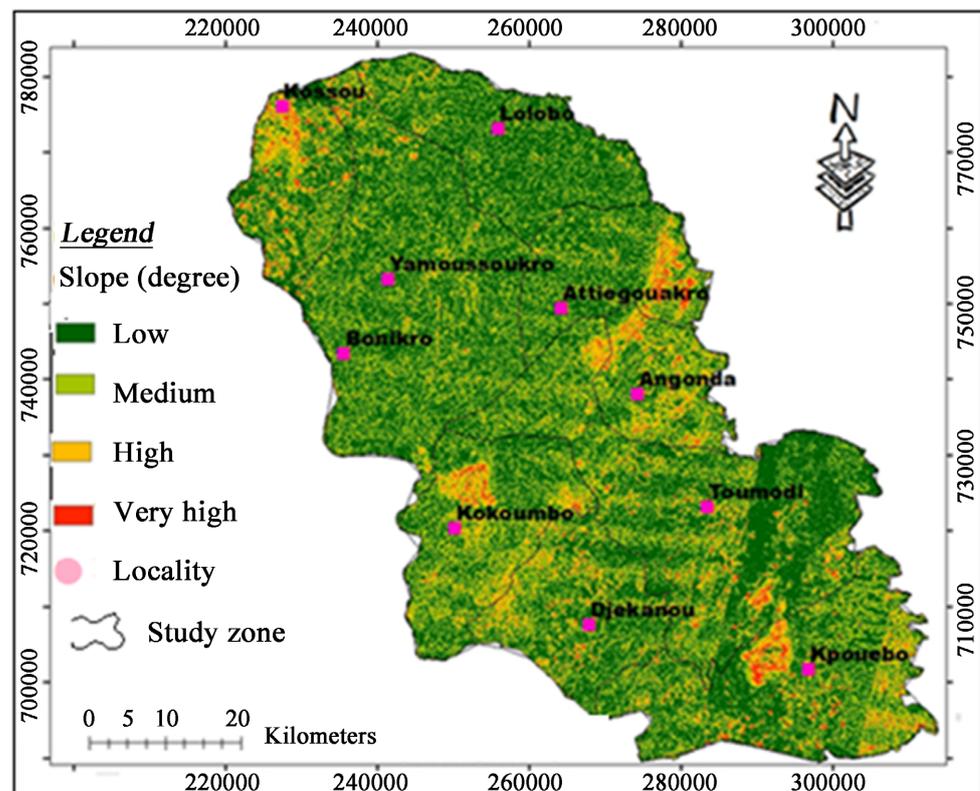


Figure 6. Slope map.

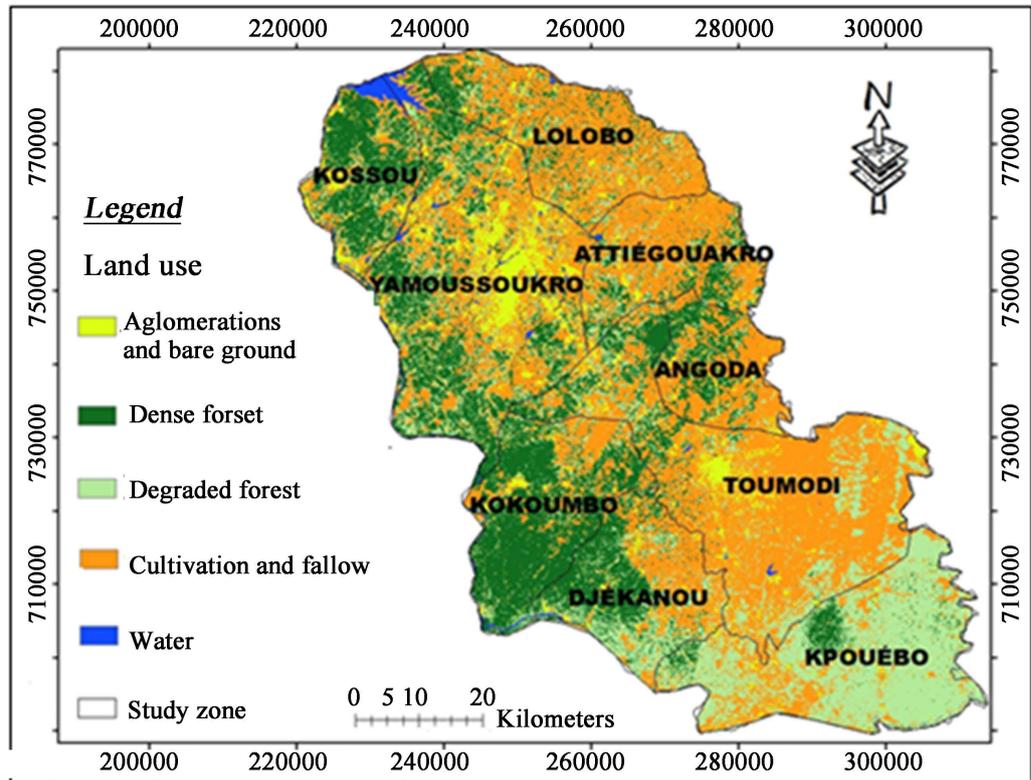


Figure 7. Land use map.

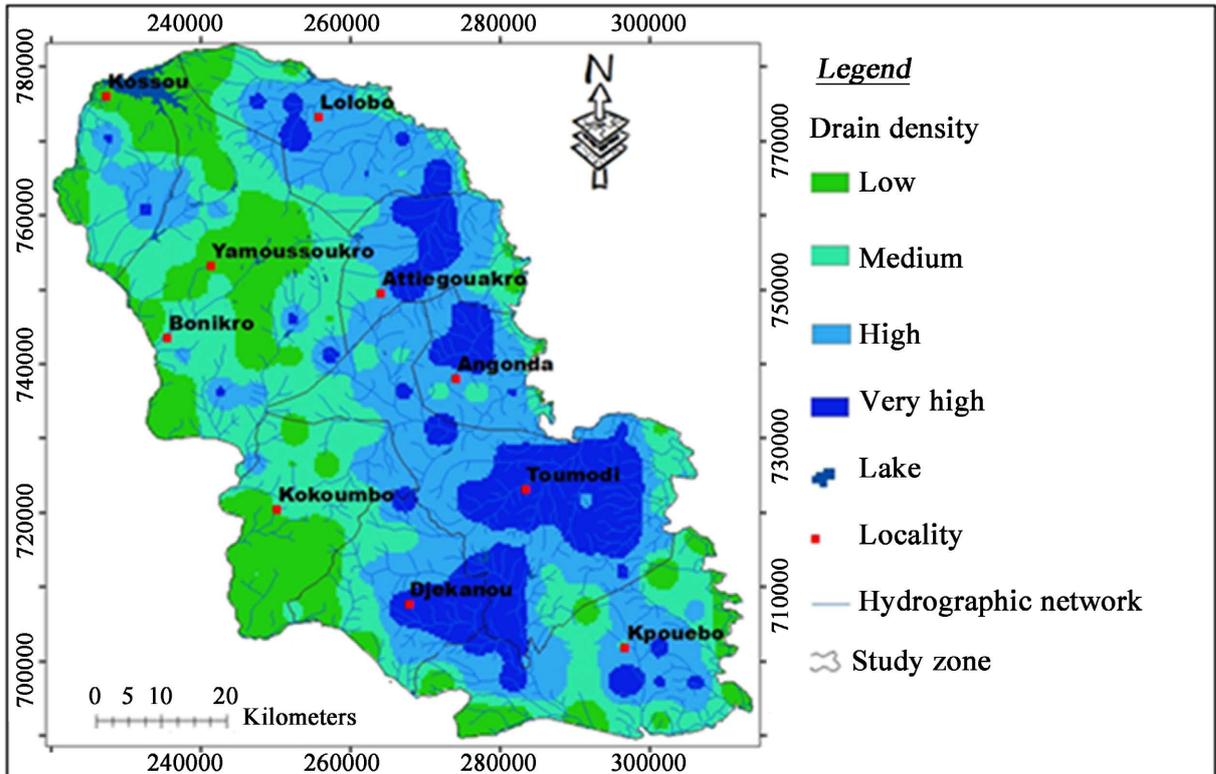


Figure 8. Drainage density map.

considered consistent. Therefore, the assigned judgments can be used for the determination of recharge areas in Yamoussoukro and Toumodi departments.

### 3.1.7. Recharge Index Map

Overlaying the different thematic maps obtained in a GIS made it possible to establish a map of groundwater recharge indices for the departments of Yamoussoukro and Toumodi (Figure 9), and from this map, the map of potential recharge areas.

The recharge index values range from 1 to 7.2. They highlight the areas where the degree of recharge is significant. Equation 17 yielded five recharge classes that range from “Poor” to “Excellent”. The values of these indices are recorded in Table 6.

Table 5. Checking the consistency of judgments.

	Df	K	P	OS	DD	C	D	E	Ymax	IC	RC
Df	0.500	0.628	0.396	0.375	0.350	0.450	2.445	5.436			
K	0.165	0.209	0.396	0.300	0.250	0.264	1.443	5.467			
P	0.165	0.069	0.132	0.225	0.200	0.158	0.822	5.195	5.261	0.065	0.058
OS	0.100	0.052	0.044	0.075	0.150	0.084	0.424	5.038			
DD	0.070	0.042	0.033	0.025	0.050	0.044	0.227	5.169			

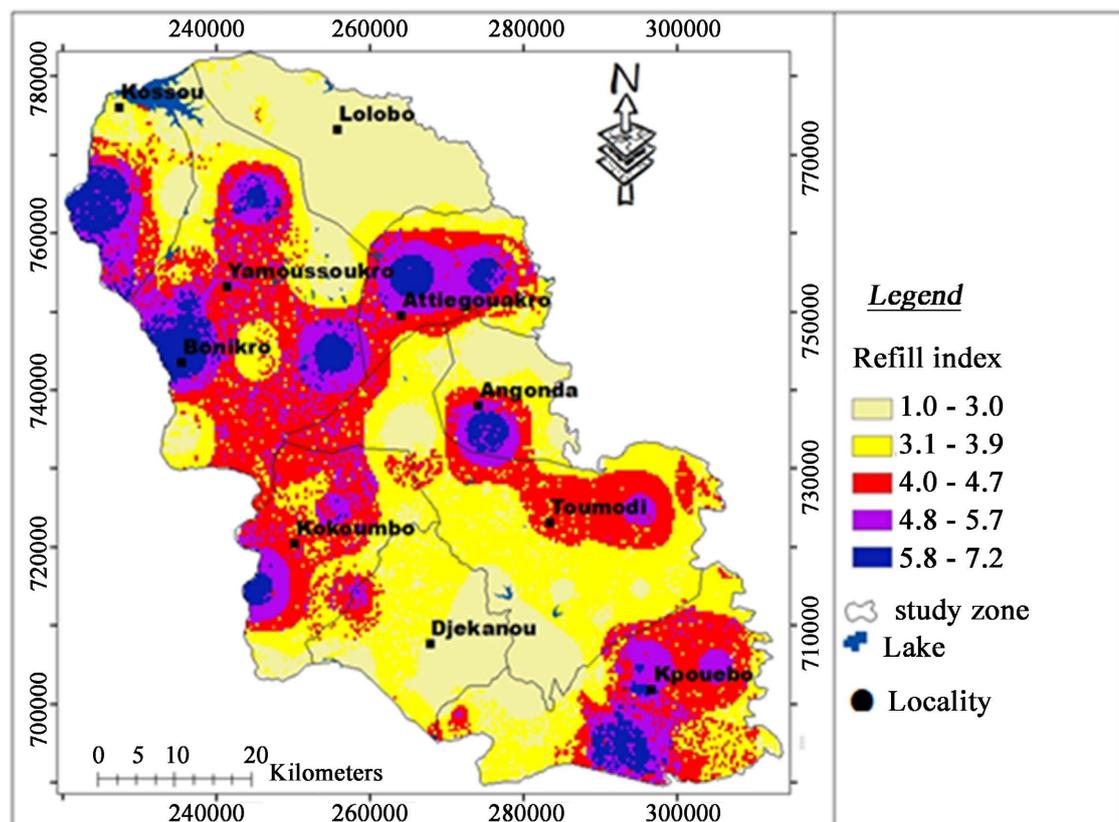


Figure 9. Recharge index map.

### 3.1.8. Map of Potential Recharge Areas for the Yamoussoukro and Toumodi Aquifers

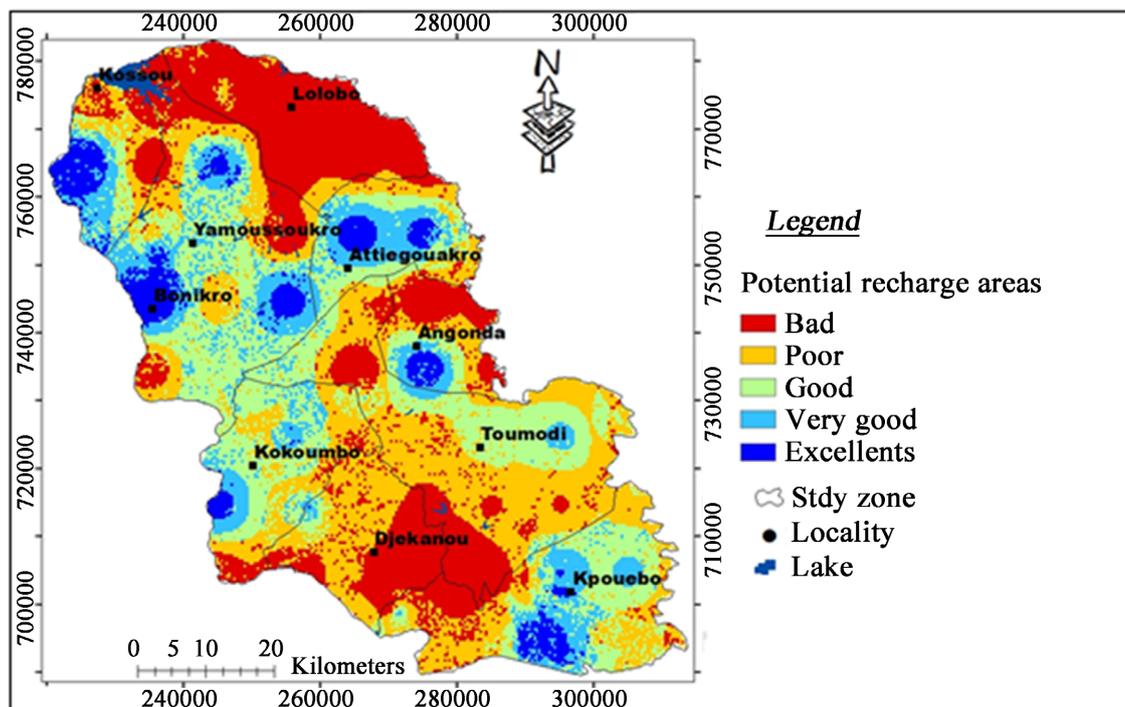
The map of potential recharge areas is presented in **Figure 10**. Analysis of this map reveals five (5) classes (Bad, Poor, Good, Very good, Excellent) of potential groundwater recharge areas in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. The “Poor” zones (26.2%) are concentrated in the sub-prefectures of Djékanou, Lolobo and Angonda. As for the “poor” class zones (30.69%), they are found throughout the zone. On the other hand, the “good”, “very good” and “excellent” classes represent 43.11% of the entire study area. However, the “Excellent” class covers 5.46% and seems to be scattered throughout the area.

### 3.2. Discussion

Remote sensing and GIS offer the possibility of obtaining numerous data sources. These can be in the form of thematic maps that can help characterize potential

**Table 6.** Classes and indices of areas favorable to groundwater infiltration.

Classes of zone favorable to recharging	Normalized recharge indices (%)	Ir	Recharge degree
1.0 - 3.0	0 - 30	2.86	Bad
3.1 - 3.9	30 - 45	3.79	Poor
4.0 - 4.7	45 - 60	4.72	Good
4.8 - 5.7	60 - 75	5.65	Very good
5.8 - 7.2	75 - 100	7.2	Excellent



**Figure 10.** Map of potential recharge areas.

recharge areas over a large area. These include land use maps, slope maps, drainage network maps, lineament maps and alteration permeability maps. The multi-criteria analysis mapping approach was used in this study to determine the spatial variability of recharge from their integration into GIS. On the map of potential recharge areas, five classes of recharge degree (Bad, Poor, Good, Very Good and Excellent) were revealed. The high recharge areas are located in areas of strong fracturing. This result is in contradiction with the work of [25] who argue that highly fractured zones are the permeable places through which water percolates and whose fracture density mapping is very useful in identifying potential recharge zones in basement environments. However, despite the evolution that the use of lineaments in hydrogeology in the search for groundwater has undergone ([26] [27]), it remains much controversial in the literature [3]. Indeed, some hydrogeologists ([28] [29]) estimate that only 30% of the lineaments observed on an image are considered to be at the same location with the same orientation. Furthermore, in hydrogeology, it is well known that the denser the drainage network, the greater the runoff and therefore the less water available for aquifer recharge [30]. The degraded forest and the crops and fallow land that make up the bulk of the vegetation cover in the high recharge potential area have a high degree of weathering permeability with relatively low slopes. This can be explained by the fact that land use, which refers to a large number of parameters present on the ground surface, influences recharge. The most important hydrogeologically are vegetation cover and impervious surfaces. Impervious surfaces (buildings, roads, etc.) considerably delay the recharge process [31], while vegetation cover improves recharge, as it favors the confinement of water in the soil preventing direct evaporation.

The method adopted in this study seems reliable, as the application of it has shown good results with other authors, [16] in Algeria; [3] in Biankouma (Côte d'Ivoire) and [4] in Bonoua (Côte d'Ivoire). However, this method has limitations. Indeed, according to [26] cited by [4], the major difficulty lies in the definition of class boundaries and weights that are assigned to the different parameters entering the realization of the GIS. The choice of the class limits is most often made according to the operator's faculty of discernment and his sense of judgment.

#### **4. Conclusion**

The multi-criteria analysis method based on cartographic data provided by remote sensing and GIS allowed the delineation of potential recharge areas for the Yamoussoukro and Toumodi departments. The map of potential recharge areas provides important preliminary information on the spatial distribution of groundwater recharge. It is subdivided into five classes, with the cumulative high recharge classes covering 43.11% of the study area. The majority of the recharge areas are located in the sub-prefectures of Yamoussoukro, Kokoumbo Attiegouakro, Toumodi and Kpouèbo. The set of maps obtained from this study provides a general overview of the hydrogeological characteristics of the departments of

Yamoussoukro and Toumodi. It is therefore a decision-making tool for ground-water exploration. However, this method should be confirmed by in-situ measurements before it can be used in decision making. In addition to a more rigorous validation involving refined measurements at different points, the validation could also lead to the definition of new criteria or to the modification of the weightings assigned to them.

## Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Directorate of Hydraulics of the Belier region, which agreed to provide us with some data related to the boreholes.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

## References

- [1] Hounguevou, S.C.G., Tohozin, C.A.B., Soumah, M. and Mouhamadou, T.I. (2014) SIG et distribution spatiale des infrastructures hydrauliques dans la commune de Zè au Bénin. *Afrique science*, **10**, 213-227.
- [2] Kouassi, A.M., Coulibaly, D., Koffi, Y.B. and Biemi, J. (2013) Application de méthodes géophysiques à l'étude de la productivité des forages d'eau en milieu cristallin: Cas de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, **2**, 324-334.
- [3] Sekouba, O., Fernand, K.K., Mahamane, B.S., Gabriel, E.A., Germain, M.A., Alexis, K.K. and René, T. (2014) Estimation et validation de la profondeur des nappes du bassin du N'zo, en Côte d'Ivoire, par le modèle WTR. *Physio-Géo*, **8**, 1-25. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3752>
- [4] Ake, G.E., Kouame, K.J., Koffi, A.B. and Jourda, J.P. (2018) Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Journal of Water Science*, **31**, 129-144. <https://doi.org/10.7202/1051696ar>
- [5] Ardana P.D.H., Sumarda, G., Sudika I.G.M. and Astariani, N.K. (2020) Comparison of Groundwater Recharge Quantification Method. *Solid State Technology*, **63**, 5088-5102.
- [6] Rodier, J.A. and Ribstein, P. (1988) Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km<sup>2</sup>. Orstom, Montpellier, 133 p.
- [7] Milville, F. and Thierry, D. (1990) Evaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale: Application a dix sites au Burkina Faso. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **35**, 37. <https://doi.org/10.1080/02626669009492403>
- [8] Abdelhamid, H., Boudoukha, A., Fatima, Z.H. and Rachid, N. (2010) Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride: Cas de la plaine d'El Outaya, Biskra, Algérie. *EuroJournals*, **45**, 1-13.
- [9] Sékouba, O., Adon G.C., Akpa, Y.L., Saley M.B., Koffi, K.K.F. and Therrien, R. (2017) Identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du bassin

- versant du N'zo (Ouest de La Côte d'Ivoire): Contribution du SIG et de la Télédétection. *European Scientific Journal*, **13**, 1857-7881.  
<https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192>
- [10] Ehoussou, K.M., Kouassi, A.M. and Kamagaté, B. (2019) Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du bélier, centre de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, **33**, 137-160.
- [11] Yacé, I. (1976) Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de FETTEKRO en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 373 p.
- [12] Daouda, Y.B. (1998) Litho stratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, Orléans, 190 p.
- [13] Saaty, T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, 19 p.
- [14] Edoukou, J.D., Kouame, J.K., Deh, K.S., Abinan, A.T. and Jourda, J.P. (2016) Contribution of the Sensitivity Analysis in Groundwater Vulnerability Assessing Using the Drastic Method: Application to Groundwater in Dabou Region (Southern of Côte d'Ivoire). *Journal of Environment Protection*, **7**, 129-143.  
<https://doi.org/10.4236/jep.2016.71012>
- [15] Saley, M.B. (2003) Système d'informations hydrogéologiques 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, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 195 p.
- [16] Haouchine, A., Boudoukha, A., Fatima, Z.H. and Rachid, N. (2010) Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride. *Euro Journals*, **45**, 1-13.
- [17] Koudou, A., Adiaffi, B., Assoma, T.V., Sombo, A., Amani, E.M.E. and Biemi, J. (2013) Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire. *Geo Eco Trop Journal*, **37**, 211-226.
- [18] McIver, D.K. and Friedl, M.A. (2002) Using Prior Probabilities in Decision-Tree Classification of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, **81**, 253-261.  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00003-2)
- [19] Gupta, R. and Sharma, L.K. (2020) Efficacy of Spatial Land Change Modeler as a Forecasting Indicator for Anthropogenic Change Dynamics over Five Decades: A Case Study of Shoolpaneshwar Wildlife Sanctuary, Gujarat, India. *Ecological Indicators*, **112**, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106171>
- [20] Mabillot, A. (1980) *Le forage d'Eau; Guide pratique*. Edition Offset à Saint Etienne (Loire). D.L., 3-1980, (France), 237 p.
- [21] Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.P., Saley, M.B., Adja, M.G., Kouamé, K. and Biemi, J. (2011) Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue Internationale de géomatique*, **21**, 34-38. <https://doi.org/10.3166/riq.21.43-71>
- [22] Anoh, K.A. (2014) Apport d'un SIG Et du modèle agro-hydrologique SWAT Dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin Versant du lac de Taabo (centre de la Cote d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, 217 p.
- [23] Saaty, T.L. (1984) Décider face à la complexité, une approche analytique multicritère d'aide à la decision. *Entreprise moderne d'édition*, Paris, 231 p.
- [24] Aller, L., Bernett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. (1987) DRASTIC: A

- Standardised System for Evaluation Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. EPA, Ada, Oklahoma, 622 p.  
<https://doi.org/10.1021/bk-1986-0315.ch008>
- [25] Sener, E., Davraz, A. and Ozcelik, M. (2005) An Integration of GIS and Remote Sensing in Groundwater Investigations: A Case Study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, **13**, 826-834. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0378-5>
- [26] Jourda, J.P.R., Saley, M.B., Djagoua, E.V., Kouamé, K.J., Biemi, J. and Razack, M. (2006) Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire): Approche par analyse multicritère et test de validation. *Télé-détection*, **4**, 339-357.
- [27] Youan Ta, M. (2008) Contribution de la télédétection et des systèmes d'information 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 Unique de Doctorat, Université de Cocody (Côte d'Ivoire), Cocody, 236 p.
- [28] Podwysoki, M.H. (1979) An Analysis of Fracture Trace Patterns in Areas of Flat-Lying Sedimentary Rocks for the Detection of Buried Geologic Structure (abs). *Journal of Hydrology*, **366**, 35-45.
- [29] Mabee, S.B., Hardcastle, K.C. and Wise, D.U. (1990) Correlation of Lineaments and Bedrock Fracture Fabric: Implications for Regional Fractured-Bedrock Aquifer Studies, Preliminary Results from Georgetown, Maine. *Ground Water Management*, **3**, 283-297.
- [30] Hsin-Fu, Y., Cheng-Haw, L., Kuo-Chin, H. and Po-Sun C. (2009) GIS for Assessment of Groundwater Recharge Potential Zone. *Environmental Geology*, **58**, 185-195.  
<https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>
- [31] Bou Kheir, R., Shaban, A., Girard, M.-C., Khawlie, M. and Abdallah, C. (2003) Caractérisation morpho-pédologique des zones karstiques du Liban sensibilité des sols à l'érosion hydrique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, **14**, 247-255.

# Design of a Spatial Information System for the Management of Drinking Water Supply Boreholes in the Departments of Yamoussoukro and Toumodi (Central Cote d'Ivoire)

Kouassi Hervé Jacques Kokobou, Arthur Brice Konan-Waidhet, and Tanina Drissa Soro

## ABSTRACT

Drinking water is an indispensable commodity for the life and development of the community. Despite the efforts made by the Ivorian government, much remains to be done to relieve the population. The satisfaction of such a need requires detailed and reliable information on the availability of groundwater. This study aims to design a database to manage the drinking water supply projects of the departments of Yamoussoukro and Toumodi from boreholes. The methodological approach used in this study is that of a relational database combining attribute and spatial data. The result of this work is a user-friendly interface that facilitates consultation and data entry on the boreholes. Spatial and statistical analyses show an uneven distribution of boreholes throughout the study area. Furthermore, all the boreholes in these two departments have flow rates classified as low and the most productive alteration thicknesses are between 15 and 30 m. The optimal depth of drilling in this area can be defined between 60 and 90 m. Finally, it appears from this analysis that, among all the lithological formations in these departments, the shales are the most productive. This database constitutes a real decision support tool for managers for the planning and evaluation of drilling.

**Keywords:** Drinking water supply, GIS, Hydraulic drilling, Productivity, Relational database.

**Published Online:** June 09, 2022

**ISSN:** 2684-446X

**DOI :** 10.24018/ejgeo.2022.3.3.289

**K. H. J. Kokobou**

Department of earth Sciences, Faculty of Environmental Science, Jean Lorougnon Guede University, Daloa, Cote d'Ivoire.

(e-mail: joelkokobou@gmail.com)

**A. B. Konan-Waidhet\***

Department of earth Sciences, Faculty of Environmental Science, Jean Lorougnon Guede University, Daloa, Cote d'Ivoire.

(e-mail: konanwaidhet@ujlg.edu.ci)

**T. D. Soro**

Department of earth Sciences, Faculty of Environmental Science, Jean Lorougnon Guede University, Daloa, Cote d'Ivoire.

(e-mail: standriss@gmail.com)

\*Corresponding Author

## I. INTRODUCTION

One of the most important concerns of our time is certainly the issue of accessibility to clean water. Water is essential for consumption, sanitation, hygiene, health and development. It is this importance that makes it the focus of many international forums [1], such as the World Water Conference in Mar del Plata (Argentina), the Millennium Development Goals, adopted by the United Nations (UN) General Assembly in 2000 [2].

In Côte d'Ivoire, in almost all regions, groundwater is almost destined to supply drinking water to rural populations despite the presence of numerous water reservoirs and dams that are reserved for agriculture and hydroelectricity [3]. To this end, the Ivorian state has instituted since the 1970s a program of drinking water supply (DWS) from boreholes in many localities. However, despite the efforts made by the government, much remains to be done to relieve the population because this resource is not yet accessible to all. Rural localities in the departments of Yamoussoukro and Toumodi located in the middle of the base are not immune to this problem. These difficulties could be explained by poor exploitation and management of available data [4].

Thus, to overcome this situation and to ensure a rational and sustainable management of this resource, it is necessary

to implement an appropriate decision support tool such as a database with spatial reference. Indeed, according to [5], it is appropriate to find ever more efficient solutions to explore, search and manage water resources. The search for adequate solutions for the development and management of boreholes requires the organization of all necessary data in a spatial database. This will facilitate the storage, analysis and updating of a huge volume of very diverse data and ensure easy and quick access to information [6].

Thus, the objective of this study is to design a database to manage drinking water supply projects. To achieve this, the data was organized through a geodatabase. It includes attribute data and spatial data integrated in a Geographic Information System under ArcGIS. It is thus a question of working on a relational database connected to a GIS. For the modeling of the data, the MERISE method was adopted, because it proposes a framework which makes it possible to analyze the data and to optimize the creation of the relational model starting from the Entity-Relationship formalism. The organized and structured data obtained from this method will contribute to the development of a decision support tool to facilitate decision-making in the field of drinking water supply. Thus, the design and realization of a spatial reference information system integrating information on boreholes can

meet the needs of managers, private investors and professionals working in the field of water resources [7].

## II. MATERIAL AND METHODS

### A. Study Area

The departments of Yamoussoukro and Toumodi are located in central Côte d'Ivoire. They are located between longitudes 4°40' and 5°33' West and between latitudes 6°15' and 7°6' North and cover an area of 4,789.4 km<sup>2</sup> (Fig. 1) for an estimated population of 6,500,000, or a density of 128.4 inhabitants/km<sup>2</sup>.

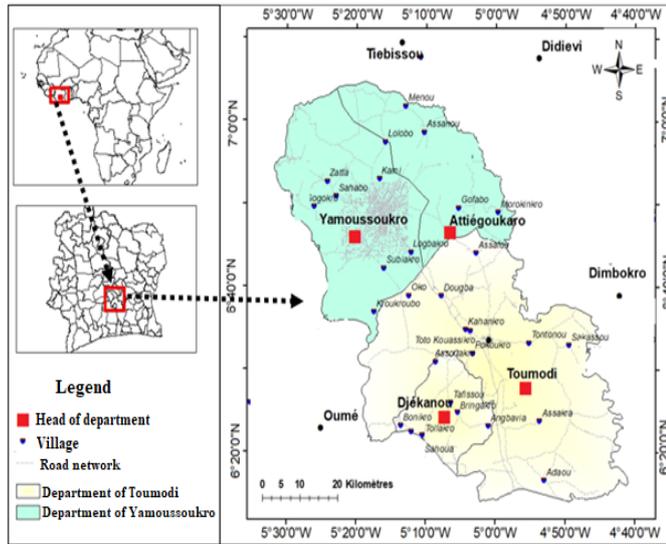


Fig. 1. Location of the study area.

The departments of Yamoussoukro and Toumodi are characterized by the plateaus of the tree savanna zone [8]. Indeed, the geomorphological landscape of the area is characterized by pediplains with quasi-rectilinear slopes, flat lowlands and very flattened and low granite mountain ranges whose average altitude is around 200 m [9]. The climate is humid tropical with two rainy seasons and two dry seasons. The average annual rainfall is close to 1200 mm. Ferralitic soils are the most abundant in these departments, where the vegetation consists of mesophilic forest, gallery forest, shrubby savannahs or savannahs with roasted trees. The Bandama River and its tributaries constitute the main hydrographic network. Other rivers such as the Kan River and the Bomba River feed the area. Geologically, these departments are located in the Paleoproterozoic domain, specifically the Birrimian of Côte d'Ivoire. According to [9] these rocks are of magmatic and metamorphic origin. They are essentially composed of biotite granites, granites with two micas, migmatites, granodiorites concordant, pegmatites of schists, quartzites and green rocks. As for the aquifer system of these departments, it is essentially constituted by basement. In this regard, the work of [10] highlighted the presence of two types of reservoirs (reservoirs of alterites and fractured reservoirs).

### B. Material

The material consists of data and software. The data came from 100 borehole data sheets and shape files from the Côte d'Ivoire geographic database containing the boundaries of the

administrative divisions. Several software programs were used in this study. These are: Microsoft Access 2007 for descriptive data processing, Power AMC 9.5 for data modeling and ArcGIS 10.4 for mapping and spatial data analysis.

### C. Methods of Designing the Database

The approach taken is that of a geodatabase (Fig. 2).

Geodatabases have the functionality of relational databases while incorporating spatial data [11]. Thus, they offer the ability to process both spatial and descriptive information in a single application. The success of the geodatabase necessarily depends on the modeling of the data.

Thus, the descriptive or attribute data related to the boreholes are integrated into Microsoft Access software based on a conceptual model. This structuring of the data or data modeling is useful in the realization of the GIS. Thereafter, the ArcGIS environment was used to set up the spatial database, the analysis, and the elaboration of thematic maps.

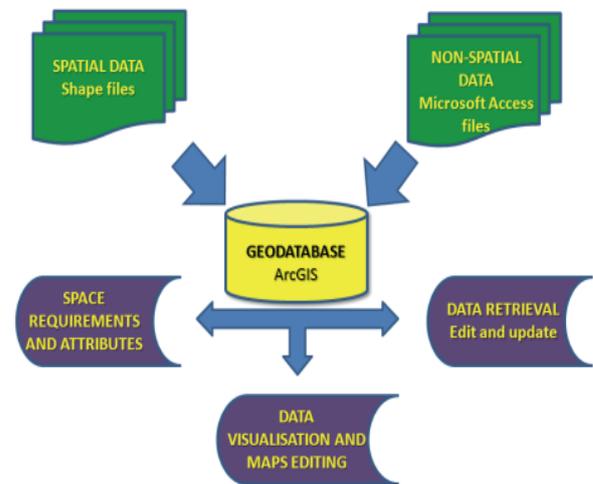


Fig. 2. Conception of the Geographic information system.

Modeling is an essential prerequisite for the development or study of computer applications. This is true for geographic databases that are also organized and structured. A model is a representation of reality used to simulate a process, predict a result or analyze a problem.

The conceptual data model (CDM) defined the geometry, attributes and logical relationships (spatial and temporal) between the objects studied. Thus, the entities were determined taking into account the content of the geodatabase which allows distinguishing real-world objects as entities with two types of attributes: alphanumeric attributes and graphical attributes. The conceptual model has been designed according to the Entity-Relationship formalism. A first approach of the work consists in making an inventory of the existing data acquired and available on each department. Then, only the relevant and existing data to develop a database management system (DBMS) on the concerned theme were retained.

The logical data model (LDM) organizes data into tables, while allowing existing relationships to be maintained. The most common logical structures are hierarchical models, networks, relational models and, in recent years, the object-oriented model. Of the four basic logic models listed above,

the relational model was chosen as the most appropriate for geodatabase purposes [12]. The "borehole" table is the central element of the database management system to which useful data for the management and monitoring of boreholes are associated.

The database is structured to ensure the storage and analysis of descriptive data collected to monitor and solve the problem of accessibility to drinking water. It is this attribute data that is linked to the spatial entity borehole. This information concerns geological, hydrodynamic, hydrochemical and technical data. Thus, after having defined the global functioning of the system with the help of modeling, a prototype is proposed. The prototype was realized on Microsoft Access software. It facilitates the input, the fast manipulation of the data and the fluidity in the consultation of the data for the users. The connection of the MS Access database to ArcMap was done via an OLE DB connection. In terms of definition, OLE DB is a data sharing module between applications, allowing to communicate the Access database in ArcMap. To maintain data integrity, it was necessary to change the \*.accdb extension to the \*.mdb extension in Access. Thus, all Microsoft Access databases (.mdb) could be displayed and made accessible using ArcCatalog. As for the spatial data, the creation of the reference frame and the base maps were digitized in ArcGIS. The projection used is the WGS 84 system, zone 30N. It ensures the compatibility of the geodatabase with other data that may be added. Three layers were digitized: the localities, the boundary of the study area, and the layer of the drilling points. From the processing of this information, which allows us to understand the structure and functional relationships of the geographically distributed objects, synthesis maps will be produced.

#### D. Data Analysis Methodology

The spatial weight of the boreholes was evaluated by the Thiessen polygon. Indeed, a Thiessen polygon is a local interpolation function using the nearest neighbor method. These polygons partition the space around base points in such a way that each one includes all possible positions for which it is closest to the sample point [13]. According to [14] this is one of the most commonly used methods for measuring the catchment areas of water infrastructure. The use of these polygons allowed the identification of areas of high concentration of boreholes in these departments.

The analysis of productivity was done by statistical analysis and spatial interpolation using ordinary kriging (geostatistical analysis). Kriging is a method of mathematical and statistical modeling to estimate the value of a property at a point in geographic space from nearby observations (autocorrelation). It uses functions that take, at each point in space, a value that is a realization of a random process. This applies to data likely to take a different value at any point in a geographical area, such as flow rates. Indeed, the distribution of these flows was made according to the classification proposed by the Inter African Committee of Hydraulic Studies (C.I.E.H.) [15].

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Structure of the Database

The set of associations between the entity classes and the tables was created and managed in Access respecting the principle of referential integrity. Fig. 3 presents the structure of the database showing the relationship between the different entities and their attributes. The drilling table is the main element around which the other data are attached.

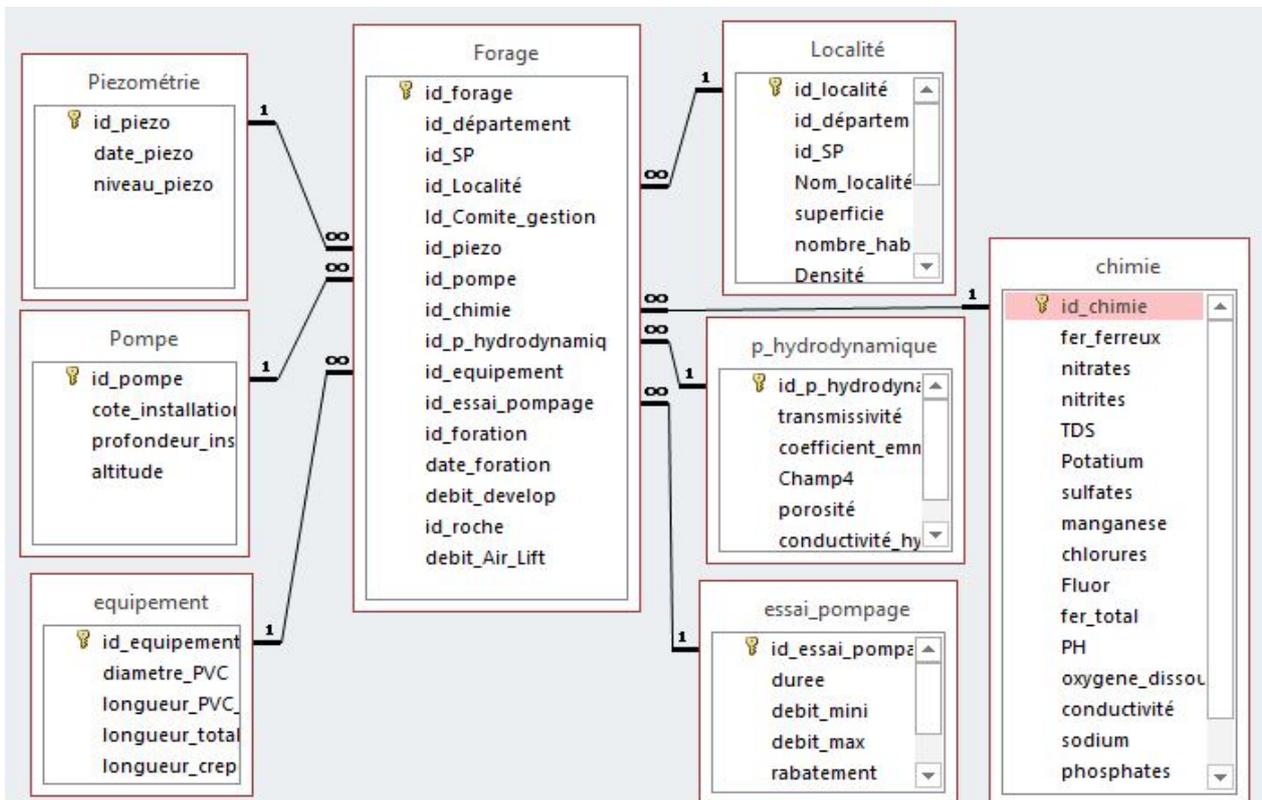


Fig. 3. Structure of the database.

**B. Database Interface**

The database transposed to MS Access provides a user-friendly and interactive way to access information without prior knowledge of Microsoft Access (Fig. 4).

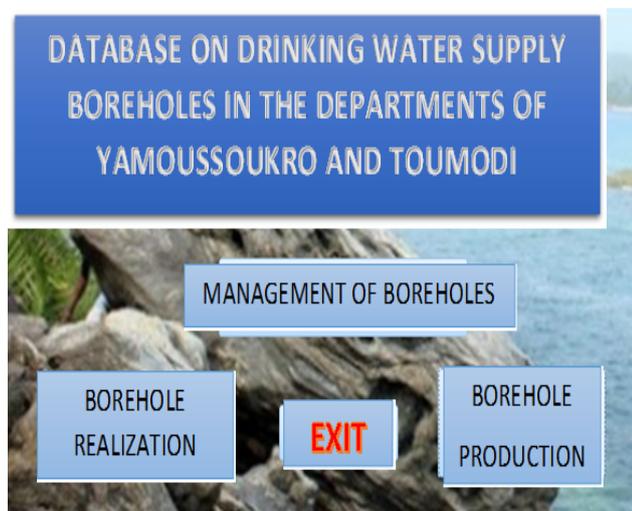


Fig. 4. Main screen of the database.

This application allows for the management and monitoring of boreholes constructed to supply drinking water to rural populations in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. It consists of three modules (realization, production, and management of boreholes) including several parameters. Several requests can be made for each module depending on the desired objective.

For example, for the production module, it allows to know the date of the beginning and the end of the execution, and the equipment plan of the work.

As for the production module, queries can lead to the knowledge of the pumping rate, the geological formations encountered, the depth, the static levels, the alteration thicknesses.

Finally, the drilling management module allows you to know the personnel in charge of monitoring the well after it has been put into service.

The ArcGIS – Access link is made via a SQL link that allows access to database information directly from ArcGIS through SQL queries. These queries are executed each time the application is opened. This solution offers the advantage of creating dynamic tables that automatically reflect the updates made to the database (addition, deletion, modification of data). In this way, changes made to the database between two sessions (e.g., addition of new inventories) are automatically taken into account in the tables and themes to which they are linked. The results of the various queries that the user needs can therefore be superimposed on the digitized spatial data.

**C. Spatial Coverage of Boreholes**

The Thiessen polygon was generated to better appreciate the spatial coverage of boreholes in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. It allowed us to visualize the position of the boreholes close to a given locality in relation to the others. This technique makes it possible to determine the density of borehole coverage (Fig. 5).

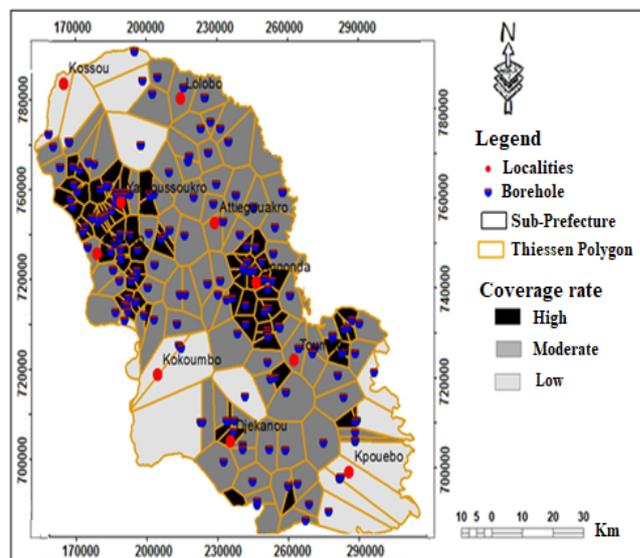


Fig. 5. Spatial coverage of boreholes.

The Thiessen polygon covers the eight sub-prefectures in the two departments. The analysis shows good drilling coverage in the sub-prefectures of Yamoussoukro and Angonda. Coverage is average in the sub-prefectures of Djekanou, Toumodi, Attiegouakro, and Lolobo. On the other hand, in the sub-prefectures of Kpouébo, Kokoumbo and Kossou, coverage is much lower. This polygon highlights the areas to be prioritized in the event of a campaign to install new boreholes in the zone.

**D. Borehole Productivity Analysis**

According to the CIEH classification, four (4) classes of flow rates have been identified (Fig. 6):

- 0 to 1 m<sup>3</sup>/h: very low flows;
- 1 to 2.5 m<sup>3</sup>/h: low flows;
- 2.5 to 5 m<sup>3</sup>/h: medium flows;
- More than 5 m<sup>3</sup>/h: high flow rates.

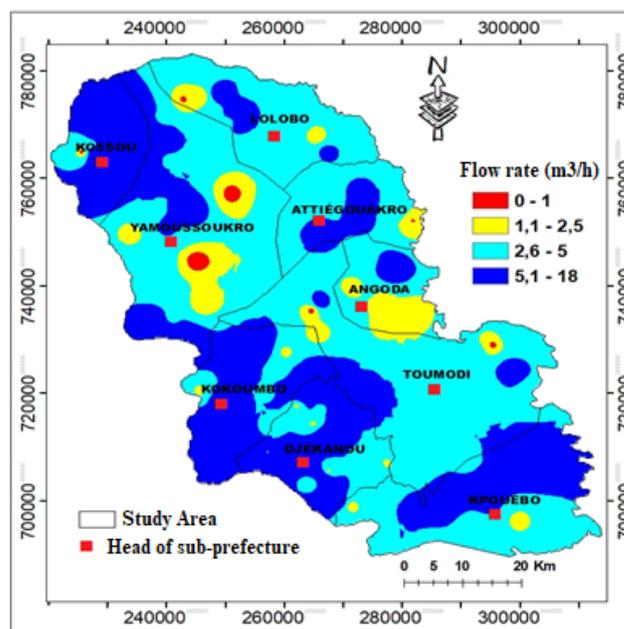


Fig. 6. Map of spatial distribution of flows.

This spatial distribution shows a dominance of the medium flow class followed by the high flow class which extends over the entire study area.

Statistical analysis of the flow classification (Fig. 7) indicates that 10.45% of the boreholes are in the very low flow class; 22.1% in the low flow class; 40.48% in the medium flow class and 26.97% in the high flow class. Thus, the majority of the boreholes are classified in the medium and high flow class.

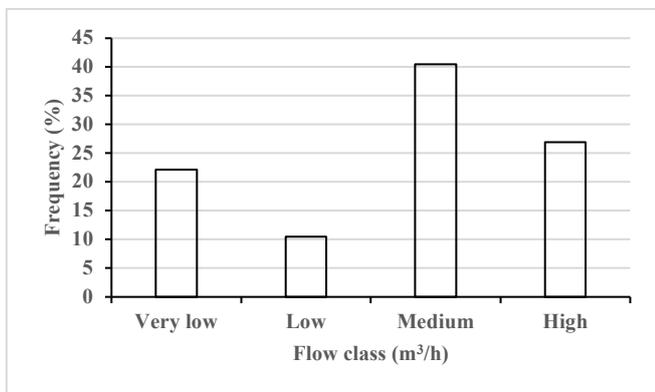


Fig. 7. Distribution of flows according to classes.

The study of the average flow rate according to the classes of alteration thicknesses is carried out to determine a probable relationship between these two parameters (Fig. 8). The analysis of this figure reveals that the alteration thicknesses can reach 60 m. The important average flows are located between 15 and 45 m of thickness with as modal class the interval between 15 and 30 m where these values reach 5.5 m<sup>3</sup>/h. However, beyond 45 m of alterite thickness the average flow rates tend to decrease to 1.5 m<sup>3</sup>/h (low flow rate class). Overall, the average flow rates are between the low and high classes.

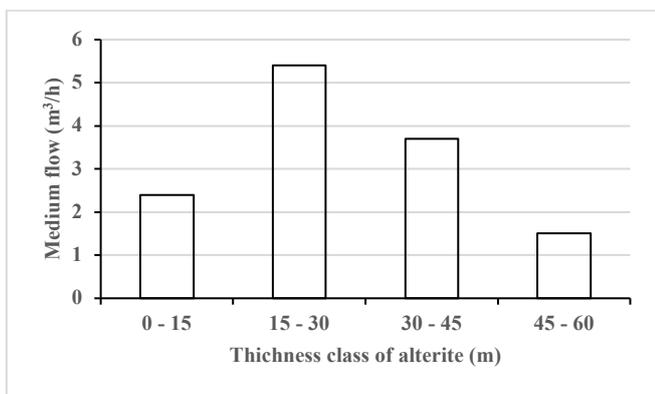


Fig. 8. Evolution of flow rates according to the thickness of alteration.

In order to be able to determine the optimal depth for obtaining productive boreholes in the departments, a histogram of the distribution of flows according to the total depth of the structure was made (Fig. 9). To do this, the flows were distributed by depth class and an average flow was calculated per class. Indeed, the average flows are relatively low in the first 60 meters of depth. On the other hand, the depths between 60 and 90 m provide the most important average flows with a maximum of 7.3 m<sup>3</sup>/h. Beyond 90 m the average flow rates decrease to 2.1 m<sup>3</sup>/h.

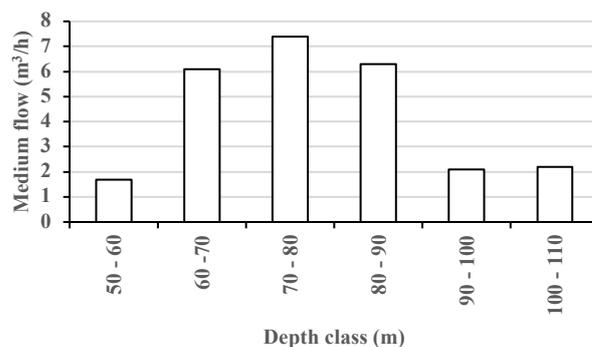


Fig. 9. Evolution of the flows according to the total depths of the boreholes.

On analysis, the optimal depth range to propose for economic drilling is between 60 and 90 m. In fact, in these classes, the average flow rates that vary between 6 and 7 m<sup>3</sup>/h have the greatest frequency. The relationship between drilling depths and flow rates also shows that high flow rates are obtained with a maximum depth between 70 and 80 m.

Fig. 10 shows the productivity of the drillings according to the different geological formations of the underlying bedrock. Thus, it appears that the basement rocks drilled belong mainly to four (4) main categories: granites, schists, migmatites and gneisses. It appears from the analysis of this graph that the average of the important flow rates is respectively 2.78 m<sup>3</sup>/h for granite; 7.28 m<sup>3</sup>/h in schist formations; 4.54 m<sup>3</sup>/h in migmatites and 4.69 m<sup>3</sup>/h in Gneiss. The productivity in ascending order gives thus: Granites < Gneiss < migmatites < Schists.

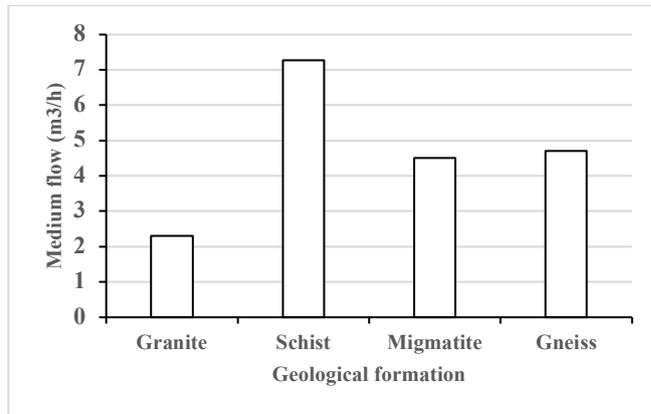


Fig. 10. Evolution of the flows according to the lithology.

E. Discussion

This study has made it possible to set up a relational database coupled with a Geographic Information System. This database facilitates access to information related to the spatial distribution and productivity of boreholes in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. It is a tool for project design and planning, monitoring, and advocacy. One of the interests of spatial databases is that they allow information from various sources to be mobilized on a single platform with limited access time, to assist in the design of maps that meet specific needs, and to save time in the production of information useful for decision-making through possible automation of processing chains [16]. Because the size of the study area was medium, Microsoft Access was chosen to design the database, as it allowed for

conclusions regarding the success and functionality of the small-scale pilot design [17]. This allows the user to formulate queries to search and retrieve information from the data set. The Thiessen polygon shows an uneven distribution of boreholes in the departments of Toumodi and Yamoussoukro.

In fact, several boreholes are concentrated in the same place. The siting of boreholes must be in agreement with the population. According to [13] the opinion of the population is very important in understanding the location of installation and the possible shape of the said works, as this would certainly avoid problems of drinking water supply. The statistical analysis from the Database related the flow rate with several physical drilling parameters related to the productivity of the aquifer. Changes in flow rate and weathering thicknesses do not appear to be moving in the same direction. According to [18], this conclusion is drawn because parameters such as the nature of the alteration and the source rock from which the alteration originates are not taken into account. Moreover, the research of [19] showed that in Côte d'Ivoire the productivity of drilling increases with the thickness of alteration on crystalline and crystallophyllous rocks and decreases when it comes to birimian shales. Generally, exploitation flows greater than 2 m<sup>3</sup>/h are found in areas where the thickness of the alterites is between 10 and 70 m [20]. In the departments of Yamoussoukro and Toumodi, high flows ( $Q > 5$  m<sup>3</sup>/h) are observed between 15 and 45 m.

This result complements other work done in Côte d'Ivoire. Indeed, in the region of Oumé it appears that the slice (0–30 m) of thickness of alterites is conducive to obtaining strong flows [21] in Bondoukou between 10 and 40 or even 45 m [9] and in Bongouanou between 70 and 80 m [22]. Regarding depth, [23] estimated that there is a depth beyond which the chances of finding a good flowing aquifer horizon are negative, specifically in the altered basement rocks. Therefore, a certain range of optimal depths supposed to have a satisfactory productivity (80 m on granites, and 100 m on shales) has been defined by several authors [24]; [23] and [25]. With regard to the boreholes studied in the departments of Yamoussoukro and Toumodi, the optimal depth of productivity is between 40 and 80 m. This result is consistent with work done in Côte d'Ivoire setting the lower limit for the existence of open fissures between 50 m and 70 m depth [26]. The relationship between productivity and the nature of the aquifers that was discussed in this study shows that shales are more productive than granites. These results are consistent with the work of a number of authors who have worked in Côte d'Ivoire in the basement zone [24] and [27]. All these authors attest to the good productivity of drilling in the shales in the Ivorian basement zone. According to [18], this would be favored by certain conditions (rectified, fractured, with open folds and occupying topographically low areas).

#### IV. CONCLUSION

At the end of this study, it appears that a study concerning drinking water supply requires the compilation of a huge volume of reliable hydrogeological data. The acquisition being costly and time consuming, the archiving and updating of this information within a single computerized system, allows an easier and faster access to this information. The

results of this study highlight the integration of a dynamic link between Microsoft Access and ArcGIS. This application allows an easy use of the different data available and gives it an evolutionary capacity. It allows non-GIS specialists to easily access the elements of the database in a graphical and interactive way on the screen. When this tool is coupled with other forecasting methods such as modeling and statistics, it constitutes a real decision support tool for groundwater resources management. The spatialization of the works shows an unequal distribution of the drillings over the study area. Spatial and statistical analyses highlighted the lower productive alteration thicknesses in the departments of Yamoussoukro and Toumodi. Moreover, an optimal depth of between 70 and 80 m would allow for good flow rates. Boreholes drilled in shale give higher flow rates (and are therefore more productive) than those drilled in other geological layers.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude to the Directorate of Hydraulics of the Belier region, which agreed to provide us with some data related to the boreholes.

#### FUNDING

This study was carried out using own resources.

#### CONFLICT OF INTEREST

Authors declare that they do not have any conflict of interest.

#### REFERENCES

- [1] Lawani ANR, Boko G, Manou EB, Wertz I, Vercauteren DM, Kelome AN. Contribution des Systèmes d'Information Géographique (SIG) à l'analyse de l'approvisionnement en Eau Potable dans la Commune de Kétou au Sud du Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2021;15(1):338–353.
- [2] Sokegebe OY, Djeri B, Kogno E, Kangni Dossou M, Mensah RT, Soney K. Utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une gestion optimale des ressources en eau en Afrique Occidentale: Cas de la commune de Nikki en République du Bénin. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2017;19(3):526–541.
- [3] Soro G, Soro TD, Fossou NM-R, Adjiri OA, Soro N. Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2019;13(3):1870–1889.
- [4] Konan-Waidhet AB, Kouadio KE, Dibi B, Ake GE, Savane I. Contribution à la création d'une base de données spatiale pour la gestion des forages en milieu fissuré: cas du Denguelé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2010;4(6):2046–2059.
- [5] Böker E. Développement d'une base de données hydrogéologiques liée aux forages en milieu fissuré et analyse géospatiale par systèmes d'information géographique. Certificat de spécialisation en géomatique 3e cycle. Université de Genève, 2003, 50 p.
- [6] Chandoul R.E, Rebai N, Bouaziz S, Ben DH. (2008). Élaboration d'une base de données hydrogéologiques pour la région de GABÈS « BDHYDGABES ». *IXème Journées de la Géologie tunisienne*, Tunis 28–29/30 septembre 2008.
- [7] Kedaïd FZ. Développement de la base de données géothermiques de l'Algérie par un système d'information géographique. *Revue des Energies Renouvelables*, 2006;9(4):253–258.
- [8] Ehoussou KM, Kouassi AM et Kamagaté B. Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du bélier, centre de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 2019;33:137–160.
- [9] Yao KA, Kouassi AM, Koffi YB, Biemi J. Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la

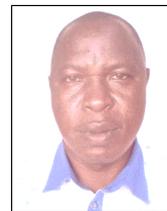
- région de Toumodi (centre de la Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Hydrology*, 2010;18(26):1–15.
- [10] N'go YA, Goné DL, Savané I, Goblé MM. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique SCIENCE*, 2005;1(1):127–144.
- [11] Wojda P, Brouyère S, Derouane J, Dassargues A. HydroCube: an entityrelationship hydrogeological data model. *Hydrogeology Journal*, 2010;18:1953–1962.
- [12] Kaimarisa D, Sylaioub S, Georgoulac O, Patiasc P. GIS of landmarks management. *Journal of Cultural Heritage*, 2011, 12: 65–73.
- [13] Hounguevou SCG, Tohozin CAB., Soumah M, Toko-Mouhamadou I. SIG et distribution spatiale des infrastructures hydrauliques dans la commune de Zè au Bénin. *Afrique Science*, 2014;10(2):213–227.
- [14] Tohozin CAB, Dossou GO. Analyse de la répartition spatiale des places publiques dans la ville de Porto-Novo, Bénin. *Afrique Science*, 2014;10(4):191–199.
- [15] Lasm T. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2000, p. 274.
- [16] Monat F. Mise en place d'un système d'information géographique (SIG) sur le bassin du Merguellil (Tunisie): stage de deuxième année: rapport technique. Montpellier (FRA); Tunis: ENSA; IRD, 2006, 99 p.
- [17] Konan-Waidhet AB, Kouadio KE, Dibi B, Ake GEA. Apport des techniques géospatiales pour l'analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région de Dioulatiedougou (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2013;7(6):2611–2625.
- [18] Mangoua MJ., Toure S, Goula BTA., Yao KB, Savane I, Biemi J. Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 2010;16:243–259.
- [19] Berger J, Camerlo J, Fahy JC, Haubert M. Etude des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin: la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). *Bull. BRGM*, section III, 1980, 2è série, n°4, pp 273–291.
- [20] Biscaldi R. Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale. *BRGM-CIEH*, 1967; 2:Ouagadougou, 437 p.
- [21] Baka D, Gnamba FM, Yao KT, Youan-Ta M. Influence des caractéristiques de l'aquifère sur la productivité des forages dans la région d'oumé (centre-ouest côte d'ivoire). *Asian Journal of Science and Technology*, 2019;10(08):10005–10013.
- [22] Assemian EA, Kouamé FK, Saley MB, Affian K, Youan Ta M, Jourda, JR, Biemi, J. Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives: cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2014;27(1):81–97. <https://doi.org/10.7202/1021984a>.
- [23] Kouadio EK, Nagnin S, Savane I. Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle: application à la région du Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2010;23(1):1–15.
- [24] Biemi J. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versant subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doct. d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 1992, 479 p.
- [25] Gnamba FM, Oga YMS, Gngangne T, Lasm T, Biémi J, Kouakou YKN. Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 2014;10(5). ISSN: 1857–7881 (Print) e - ISSN 1857–7431.
- [26] Jourda PJR. 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'Etat, Université de Cocody, (Côte d'Ivoire), 2005, 430 p.
- [27] Dibi B, Inza D, Goula BTA, Savane I, Biemi J. Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences et Technologies*, 2004;13:25–31.



**Kokobou Kouassi Hervé Jacques** is a Ph.D Student at Jean Lorougnon Guede University of Daloa. His research areas include geodatabase, Water resources, Remote Sensing and GIS.



**Dr Konan-Waidhet Arthur Brice** obtained his Ph.D degree in Remote Sensing and GIS from University Center for Research and Remote Sensing Application at the University of Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire in 2007. Currently, He is an assistant Professor of Remote Sensing and GIS at Jean Lorougnon Guede University of Daloa. His teaching and research areas include geodatabase, Water resources, Remote Sensing, GIS and Climate Change.



**Dr Soro Tanina Drissa** obtained his Ph.D degree in Hydrogeology from University Felix Houphouët Boigny of Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire in 2014. Currently, He is an assistant Professor at Jean Lorougnon Guede University of Daloa. His teaching and research areas include Water resources and Climate Change.