



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE  
UFR ENVIRONNEMENT**

**REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE**

**Union-Discipline-Travail**

-----  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche Scientifique**

**ANNEE ACADEMIQUE :**

**2020-2021**

**N° D'ORDRE : 0409/2021**

**N° CARTE D'ETUDIANT :**

**CI0416008579**

## **MASTER**

**PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET GESTION DES RISQUES**

**THEME :**

**EVALUATION DU RISQUE A LA POLLUTION  
D'UNE ZONE FAVORABLE A L'IMPLANTATION  
D'UN POINT D'EAU : CAS DU DEPARTEMENT  
DE YAMOISSOUKRO (CENTRE DE LA CÔTE  
D'IVOIRE)**

**LABORATOIRE :**

**SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**Présenté par :**

**MEITE Fatoumata Nadège**

**JURY**

**Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Directeur : M. ASSEMIAN N'guessan Emmanuel, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Encadreur : M. MANGOVA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,  
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Soutenu publiquement**

**Le : 06/10/2021**



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE  
UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :

2020-2021

N° D'ORDRE : 0409/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0416008579

## MASTER

PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET GESTION DES RISQUES

THEME :

**EVALUATION DU RISQUE A LA POLLUTION  
D'UNE ZONE FAVORABLE A L'IMPLANTATION  
D'UN POINT D'EAU : CAS DU DEPARTEMENT DE  
YAMOISSOUKRO (CENTRE DE LA CÔTE  
D'IVOIRE)**

LABORATOIRE :

SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE DE  
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

**MEITE Fatoumata Nadège**

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. ASSEMIAN N'guéssan Emmanuel, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. MANGOVA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,  
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement

Le : 06/10/2021

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,  
Université Jean Lorougnon Guédé

## **TABLE DES MATIERES**

<b>DEDICACE.....</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : GENERALITES .....</b>	<b>3</b>
1.1    Présentation de la zone d'étude .....	3
1.1.1    Localisation de la zone d'étude .....	3
1.1.2    Relief .....	3
1.1.3    Types de sols .....	4
1.1.4    Végétation .....	4
1.1.5    Climat .....	4
1.1.6    Réseau hydrographique .....	5
1.1.7    Situation socio-économiques.....	6
1.1.7.3    Activités économiques.....	6
1.1.8    Contexte géologique de la zone d'étude .....	7
1.1.9    Context hydrogéologique .....	7
1.2    Etat des lieux en matière de potentialité des ressources en eau souterraine .....	8
1.3    Etat des lieux sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine.....	9
1.3.1    Notion de vulnérabilité.....	9
1.3.2    Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines .....	9
1.3.3    Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine : la méthode PaPRI.....	10

<b>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES .....</b>	<b>11</b>
2.1 MATERIEL .....	11
2.1.1 Données .....	11
2.1.2 Outils de traitement de données .....	11
2.2 METHODES .....	11
2.2.1 Détermination des zones potentielles de stockage des eaux souterraines du département de Yamoussoukro .....	11
2.2.2 Cartographie des zones vulnérables à la pollution des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro à partir de la méthode PaPRI .....	18
<b>TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>25</b>
3.1 Résultats.....	24
3.1.1. Potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	24
3.1.2. Zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro.....	32
3.2 Discussion.....	38
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>42</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>43</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>ix</b>

## **DEDICACE**

*Je dédie ce travail à toutes les personnes qui, depuis ma naissance se sont sacrifiées pour que j'en sois là :*

*D'abord*

*A mon père **MEITE Sindou** et mes **Mamans MEITE Assata** et **SOUMAHORO Namizata**, sachez que vos efforts et souffrances pour moi n'ont pas été vains. Que Dieu vous donne une longue Vie afin que vous puissiez bénéficier des fruits de cet effort.*

*Ensuite*

*A Monsieur **SOUMAHORO YAYA KADER**, Pour ton soutien pendant ce travail Que Dieu fortifie nos liens pour un lendemain meilleur !*

*A feu ma grande sœur **MEITE Namawa***

## **REMERCIEMENTS**

Le présent mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide bienveillante, la compréhension et le dévouement d'un certain nombre de personnes qui, par leur présence et leurs conseils, nous ont apporté leur soutien. Qu'elles reçoivent ici, nos salutations les plus sincères et notre profonde reconnaissance.

Nos remerciements vont tout d'abord à l'endroit du personnel de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa (Côte d'Ivoire) avec à sa tête Mme TIDOU Abiba Sanogo, Epouse KONE, Professeur Titulaire, Présidente de cette institution, pour avoir accepté notre inscription en Master de Protection de l'Environnement et Gestion des Risques (PEGR) et pour la formation de qualité dont nous avons bénéficié.

Nous remercions le directeur de l'UFR Environnement, M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire. L'Unité de Formation et de Recherche (UFR) qu'il dirige a pris en charge notre formation. Professeur, vous n'êtes pas seulement Directeur mais bien plus, vous êtes un grand travailleur, un père attentif et prêt à tout pour que vos enfants que nous sommes soient toujours dans les meilleures conditions d'apprentissage.

Nous exprimons aussi notre profonde reconnaissance aux responsables de filière PEGR M. ASSEMIEN N'Guéssan Emmanuel, Maître de Conférence et M. ALIKO N'Guéssan Gustave, Maître de Conférences, ainsi qu'à tous les enseignants et personnel administratif et technique de l'UFR Environnement de nous avoir apporté la motivation, les conseils, les encouragements ainsi que la formation de qualité.

Au Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UFR Environnement, M. DIBI Brou, Maître de Conférences, nous voudrions lui témoigner notre gratitude de nous avoir accepté au sein du laboratoire pour le bon déroulement de cette étude.

Nous adressons particulièrement nos remerciements à M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences, d'avoir accepté l'encadrement de ce travail. Nous vous remercions Docteur pour votre disponibilité et vos critiques pertinentes. Merci infiniment pour votre inestimable soutien scientifique et moral, pour vos précieux conseils et votre sympathie ! Vous nous avez beaucoup appris. Que vous prospériez à tous égards !

Nous remercions également Monsieur EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant, examinateur de ce mémoire de master, d'avoir accepté de participer à l'amélioration de ce document.

Nos remerciements vont également à l'endroit de tous nos aînés du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour leur soutien et encouragement, plus

particulièrement M. OUEDE Gla Blaise, M. TOURE Fanraban Fabrice, M. KONAN Yao Emile Desmond, M. COULIBALY Brice. Nous voudrions particulièrement remercier M. OUATTARA Gningnéri Souleymane pour sa contribution à l'élaboration de ce travail.

A tous nos aimables amis de la filière Protection de l'Environnement et Gestion des Risques, et de Génie de l'Eau et de l'Environnement, nous leur disons merci pour le soutien.

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AHP	: Analytical Hierarchy Process
AMC	: Analyse Multicritère
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
DHH	Direction de l'Hydraulique Humaine
DTH	: Direction Territoriale de l'Hydraulique
ECPSI	: Early College Program Summer Institute
INS	: Institut National de la Statistique
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
OLI	: Operational Land Imager
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONEP	: Office Nationale de l'eau potable
PaPRI	: Protection des aquifères basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration
PCR	: Plan cadre de réinstallation
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
PRICI	: Projet de Renaissance des Infrastructures et de gestion urbaine en Côte d'Ivoire
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères .....	16
<b>Tableau II</b> : Classification et standardisation des paramètres de protection (P).....	19
<b>Tableau III</b> : Classification et standardisation des paramètres de réservoir (R).....	20
<b>Tableau IV</b> : Classification et standardisation des Paramètres d'Infiltration (I). .....	21
<b>Tableau V</b> : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de facteurs de Saaty modifié par Mangoua et <i>al.</i> (2018) .....	22
<b>Tableau VI</b> : Classification de la vulnérabilité selon Dörfliger & Plagnes, (2009).....	23
<b>Tableau VII</b> : Statistique des paramètres de disponibilité en eau souterraine .....	26
<b>Tableau VIII</b> : Statistique des paramètres d'exploitabilité en eau souterraine.....	27
<b>Tableau IX</b> : Statistique des paramètres d'accessibilité en eaux.....	29
<b>Tableau X</b> : Statistique des indicateurs de potentialité .....	31
<b>Tableau XI</b> : Statistique des paramètres de protection .....	33
<b>Tableau XII</b> : Statistique des paramètres du reservoir.....	35
<b>Tableau XIII</b> : Statistique des paramètres de l'infiltration.....	37
<b>Tableau XIV</b> : Statistique des paramètres de vulnérabilité .....	38

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Présentation de la zone d'étude .....	3
<b>Figure 2</b> : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1990-2019).....	5
<b>Figure 3</b> : Carte du réseau hydrographique du département de Yamoussoukro .....	5
<b>Figure 4</b> : Carte géologique du département de Yamoussoukro .....	7
<b>Figure 5</b> : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin .....	8
<b>Figure 6</b> : Etapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité.....	21
<b>Figure 7</b> : Cartes des paramètres de l'indicateur de disponibilité : (a) épaisseur d'altérations, (b) pente, (c) densité de drainage, (d) densité de fracturation et (e) infiltration .....	24
<b>Figure 8</b> : Carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro ...	25
<b>Figure 9</b> : Cartes des paramètres de l'indicateur d'exploitabilité en eau souterraine : (a) débit d'exploitation et (b) niveau statique.....	26
<b>Figure 10</b> : Carte d'exploitabilité des ressources en eaux souterraines du département de Yamoussoukro.....	27
<b>Figure 11</b> : Cartes des paramètres de l'indicateur d'accessibilité en eaux souterraines : (a) Probabilité de Succès et (b) Profondeur Totale.....	28
<b>Figure 12</b> : Carte d'accessibilité en eaux souterraines du département de Yamoussoukro .....	29
<b>Figure 13</b> : Carte des potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	31
<b>Figure 14</b> : Cartes des paramètres de la protection : (a) Indice de protection du sol ; (b) Indice de protection des altérites ; (c) Indice de protection de la zone non saturée.....	32
<b>Figure 15</b> : Carte thématique du critère protection .....	33
<b>Figure 16</b> : Cartes des paramètres du réservoir : (a) densité de fracturation, (b) nature de la roche ou lithologie.....	34
<b>Figure 17</b> : Carte thématique du critère roche ou réservoir.....	35
<b>Figure 18</b> : Cartes des paramètres infiltration : (a) pente, (b) densité de drainage .....	36
<b>Figure 19</b> : Carte thématique du critère infiltration.....	36
<b>Figure 20</b> : Carte de la vulnérabilité globale à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro .....	38

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe 1** : Classification et standardisation des critères

**Annexe 2** : Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'eau est un élément vital pour l'homme. Disposer d'une eau de qualité et en quantité suffisante contribue au maintien de la santé (Mangoua *et al.*, 2018). Elle est abondante sur notre planète car son volume est estimé à 1,36 milliards de km<sup>3</sup> (Margat, 1991). Mais 97,4% est constitué d'océans et d'eau salée et seulement 2,6% d'eau douce est exploitable pour la consommation humaine (El Hadani, 1997). Pourtant, dans presque toutes les grandes villes du monde, l'action anthropique n'épargne pas cette ressource des différentes formes de pollution.

En 2011, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), plus de 2 millions de personnes, surtout les enfants de moins de cinq ans dans les pays en développement où les mesures d'hygiène et d'assainissement sont insuffisantes, mouraient chaque année de maladies diarrhéiques dont 90% sont imputables à la mauvaise qualité de l'eau de boisson (Kouassi *et al.*, 2017). En Côte d'Ivoire, plus précisément dans les grands centres urbains en zone de socle, les eaux de surface, qui constituent une ressource abondante et pérenne, sont exploitées pour satisfaire les besoins en eau potable des populations (Ahoussi, 2008 ; Dibi, 2008). Pourtant Les ressources en eau de surface sont de plus en plus rares et dégradées (Mahe *et al.*, 2001). L'approvisionnement en eau potable est donc orienté vers la recherche des eaux souterraines profondes dont la qualité répond généralement aux directives de l'OMS (Biémi, 1992): c'est le cas du département de Yamoussoukro.

Face à la croissance démographique que va engendrer le transfert effectif de la capitale politique et administrative de la Côte d'Ivoire à Yamoussoukro, il faut craindre un besoin important en eau potable de ses localités.

Le département de Yamoussoukro renferme des aquifères d'eau souterraine qui représentent un enjeu stratégique pour sa population. A cet effet, les objectifs de planification à long terme de la gestion de l'eau sur ce département suggèrent de s'intéresser à sa vulnérabilité intrinsèque, vue qu'elle peut être considérée comme invariante dans le temps.

En effet, les méthodes de vulnérabilité à la pollution du fait de leurs performances dans la délimitation des périmètres de protection se présentent comme les méthodes les plus appropriées selon Dibi *et al.* (2013). Les connaissances hydrogéologiques, géologiques et structurales sont synthétisées et traitées grâce à un Système d'Informations Géographiques qui aide à la compréhension du comportement des aquifères de fissures. La situation portant sur la pollution des eaux souterraine devient donc de plus en plus préoccupante ; d'où l'importance de cette étude intitulée : « étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro ». Elle a pour objectif général d'évaluer la vulnérabilité à la pollution des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro. De façon spécifique, il s'agit de :

## INTRODUCTION

- déterminer les zones potentielles de stockage des eaux souterraines du département de Yamoussoukro ;
- cartographier la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro.

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

- la première est consacrée aux généralités portant sur la zone d'étude et les connaissances sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines ;
- la seconde partie est axée sur le matériel et les méthodes utilisés et ;
- la troisième partie présente les résultats obtenus et la discussion qui en découle.

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

**PREMIERE PARTIE :**  
**GENERALITES**

# GENERALITES

## 1.1 Présentation de la zone d'étude

### 1.1.1 Localisation de la zone d'étude

La zone concernée est située au centre de la Côte d'Ivoire qui elle aussi, est située à l'Ouest de l'Afrique. Elle se situe entre les longitudes 4°40' et 5°33' Ouest et entre les latitudes 6°13' et 7°6' Nord, et comprend le District de Yamoussoukro composé de quatre sous-préfectures (Yamoussoukro, Kossou, Attiéguakro et Lolobo) dont est inclus le département de Yamoussoukro (Yamoussoukro et kossou) qui couvre une superficie de 1 268 Km<sup>2</sup> (Figure 1) et une partie du district du bélier composé de cinq sous-préfectures (Toumodi, Angonda, Djékanou, Kokoumbo et Kpouébo). La commune de Yamoussoukro, chef-lieu de département et siège du District de Yamoussoukro est la capitale politique et administrative de la République de Côte d'Ivoire.

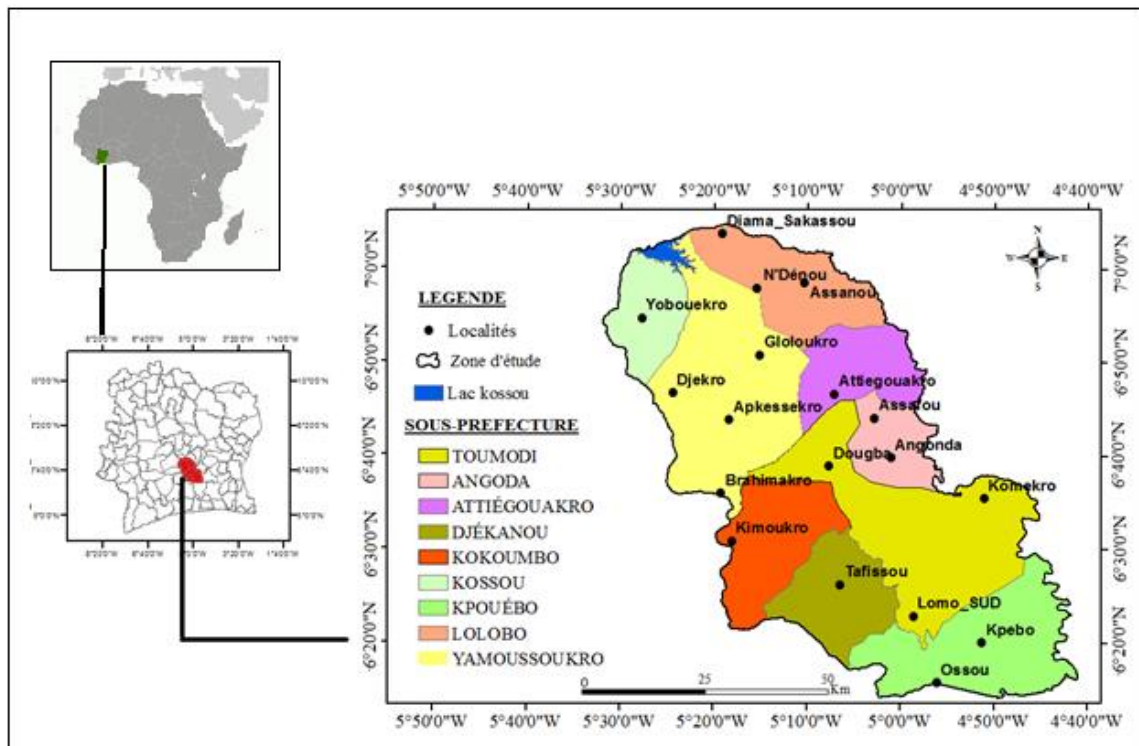


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

### 1.1.2 Relief

Le relief de la zone d'étude est dans l'ensemble constitué de plaines et de plateaux. On peut distinguer plusieurs niveaux de plateaux étagés, entre 200 et 500 mètres, séparés les uns des autres par un talus de faibles hauteurs (10 à 30 mètres) (PRICI, 2016). Quelques collines et chaînes de montagnes de 300 à 500 m d'altitude y sont également rencontrées (Leblond, 1984).



### 1.1.3 Types de sols

Les sols de la zone d'étude appartiennent aux grandes classes des sols ferrallitiques et des sols brunifiés (ferrisols) au niveau des plateaux et reliefs. Dans les plaines et les bas-fonds, les sols rencontrés appartiennent aux classes des sols peu évolués des sols hydromorphes (CPCS, 1967 ; PRICI, 2016). Ces sols sont très sensibles à l'érosion, mais présentent de bonnes caractéristiques chimiques et sont propices aux cultures vivrières (ignames, maïs, riz, etc.), aux cultures arbustives et aux cultures industrielles (PCR, 2019)

### 1.1.4 Végétation

Deux grands types de paysages végétaux se partagent le territoire ivoirien. Un paysage forestier situé au Sud et un paysage de savane dans la partie Nord du pays. La végétation de la zone appartient au domaine Guinéen et est dominée par la savane pré-forestière (zone de transition entre la forêt du Sud et la savane du Nord) parsemée plus ou moins densément de petit arbres et entrecoupées de bosquets et îlots forestiers. Des galeries forestières occupent les bas-fonds le long des cours d'eaux. Sur les sols sableux drainés, apparaissent des peuplements de rôniers et de palmier dans des prairies de hautes herbes (PRICI, 2016).

### 1.1.5 Climat

La zone d'étude est sous l'influence du climat équatorial de transition atténué ou climat Baouléen caractérisé par deux saisons :

- une saison pluvieuse qui débute au mois de mars et prend fin au mois d'octobre ;
- une saison sèche qui s'étend du mois de novembre à février.

La température moyenne de la région est d'environ 26 °C. Celle la plus élevée avoisine 28°C et s'observent aux mois de février et mars (Figure 2). Les précipitations annuelles varient entre 900 mm à 1 600 mm de pluie par an, avec une répartition spatiale très variable dans l'année. (PRICI, 2016).

## GENERALITES

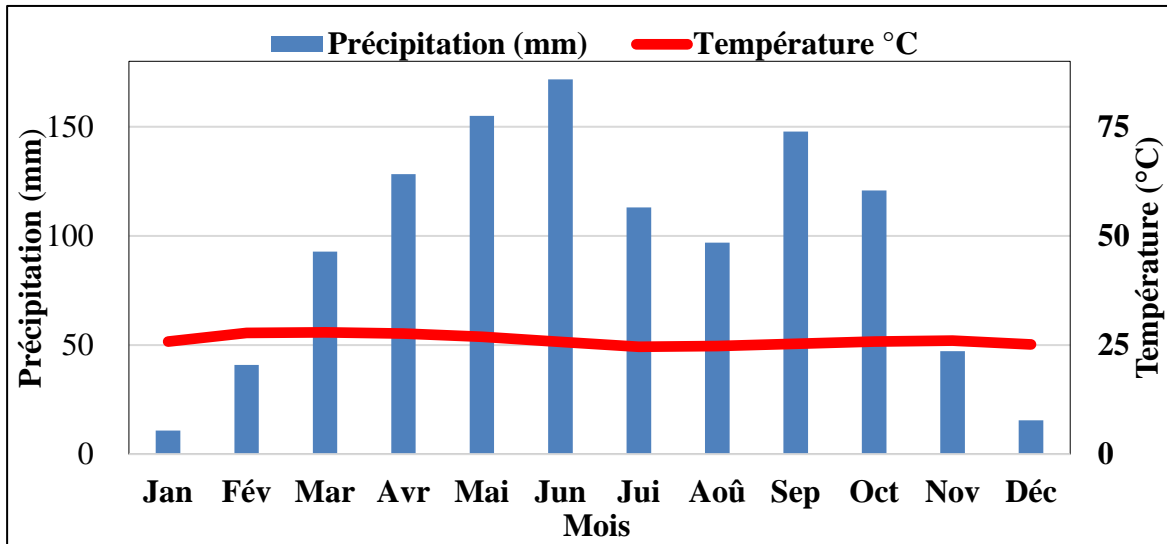


Figure 2 : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1990-2019)

### 1.1.6 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est partagé entre deux grands bassins versants : le bassin versant du fleuve Bandama et celui du fleuve N'zi. Les rivières qui le composent ont un régime irrégulier. Néanmoins, le lac de Kossou et deux affluents du N'zi (le Kan et le Praha) se distinguent par leur étendue.

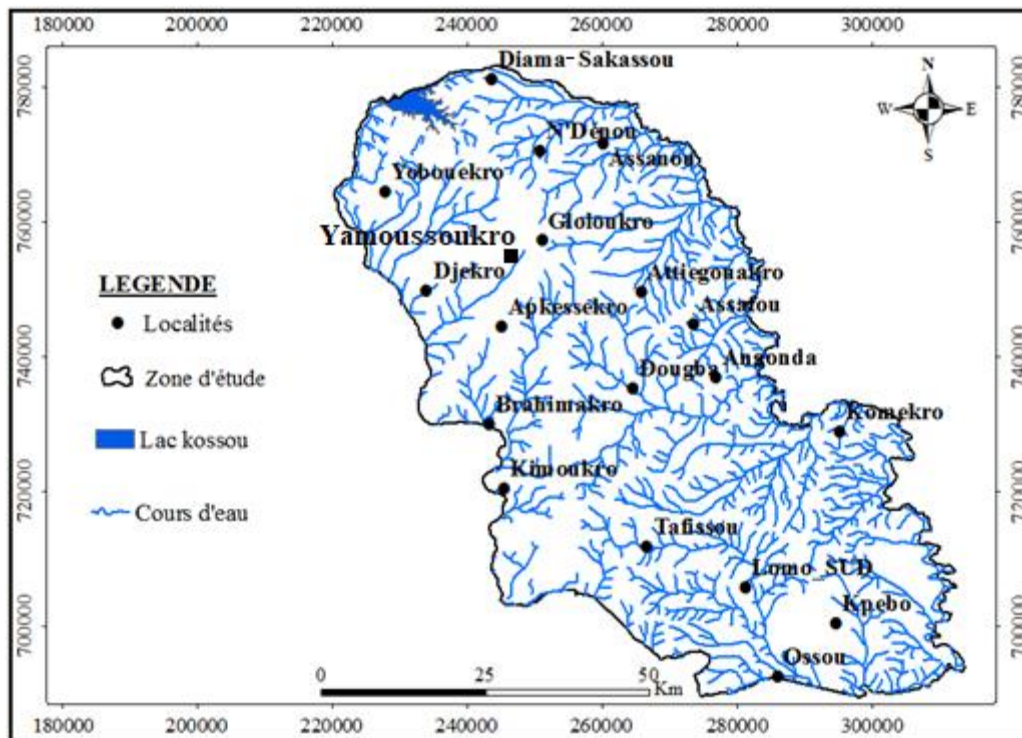


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du département de Yamoussoukro

### **1.1.7 Situation socio-économiques**

#### **1.1.7.1 Population**

Cosmopolite, le département de Yamoussoukro compte une population de 310 056 habitants en 2014 (INS, 2015), soit une densité de 244,5 habitants au kilomètre carré. Aux populations autochtones Akouè et Nanafouè auxquelles est adjoint une population étrangère estimée à plus de 17% de la population du district de Yamoussoukro. Le département de Yamoussoukro dispose d'une population jeune, avec plus 56,46% de jeune de moins de vingt ans (PRICI, 2016). A l'image de la Côte d'Ivoire, Yamoussoukro connaît un fort taux de croissance démographique annuel de 2,26% de 1998 à 2014, (INS, 2015).

#### **1.1.7.2 Approvisionnement en eau potable dans le département de Yamoussoukro**

L'épuisement des ressources en eau potable est un problème qui touche tous les continents. Selon le PNUD, la raréfaction de l'eau affecte plus de 40% de la population mondiale (OMS & UNICEF, 2017). En Côte d'Ivoire, la pénurie d'eau potable a été fortement marquée ces dernières années, notamment à Bouaké, Niakaramandougou, Ferkessédougou, Doropo, Odienné, Yamoussoukro, etc. (Joseph *et al.*, 2018). D'importantes actions d'urgence sont menées, telles que les forages et le renforcement des stations de traitement d'eau potable. Le département de Yamoussoukro, alimenté à la fois par les eaux de surface et souterraine n'est pas en marge de ces grands projets de réhabilitation. En effet, la station de traitement d'eau potable (Valéry Giscard d'Estaing 2) de Yamoussoukro construite en 1972 a été réhabilitée et renforcée dans le cadre du Projet de Renaissance des Infrastructures de Côte d'Ivoire (PRICI, 2016), ainsi sa capacité de production est passé de 20 000 m<sup>3</sup>/jour à 40 000 m<sup>3</sup>/jour, pour un besoin estimé à 27 500 m<sup>3</sup>/jour. Cependant, des difficultés d'approvisionnement en eau potable sont toujours ressenties dans certaines localités du département de Yamoussoukro.

#### **1.1.7.3 Activités économiques**

L'activité économique du département de Yamoussoukro est basée sur les secteurs primaires, secondaires et tertiaires. Le secteur primaire regroupe les activités liées à l'agriculture, l'élevage, la forêt (la production de charbon de bois, la récolte de bois de chauffe) et à l'exploitation minières. L'agriculture est la principale activité économique du département. Au niveau du secteur secondaire, il existe quelques unités industrielles, dont l'usine d'engrenage de coton à Zatta, l'entreprise industrielle de bois et le centre de stockage de produits pétroliers. A l'instar des villes ivoiriennes, Yamoussoukro a une grande partie de son économie locale située dans l'économie informelle, avec de nombreux petits métiers (PRICI, 2016).

### 1.1.8 Contexte géologique de la zone d'étude

La Côte d'Ivoire est située au cœur de la dorsale de Man et est constituée de deux grands ensembles géologiques : le socle précambrien (97,5% du territoire) et le domaine sédimentaire (2,5% du territoire). Le département de Yamoussoukro appartient à la pénéplaine granito gneissique du socle précambrien. Les principales formations géologiques sont constituées de roches magmatiques et de roches métamorphique (N'guessan *et al.*, 2014). Les roches magmatiques occupent 88,7% du département et sont constituées des granites à biotite, des migmatites, des granodiorites, des diorites et des gneiss (Figure 4). Les formations métamorphiques représentent 11,3% du département et sont composées de schistes, grès, conglomérats, amphibolites, basaltes, tufs, brèches et roches basiques. Ces deux principales formations géologiques conduisent à la formation d'un contexte hydrogéologique caractérisé par un type d'aquifère composite sur le département de Yamoussoukro ; un aquifère d'altérites et un aquifère fissuré ou fracturé.

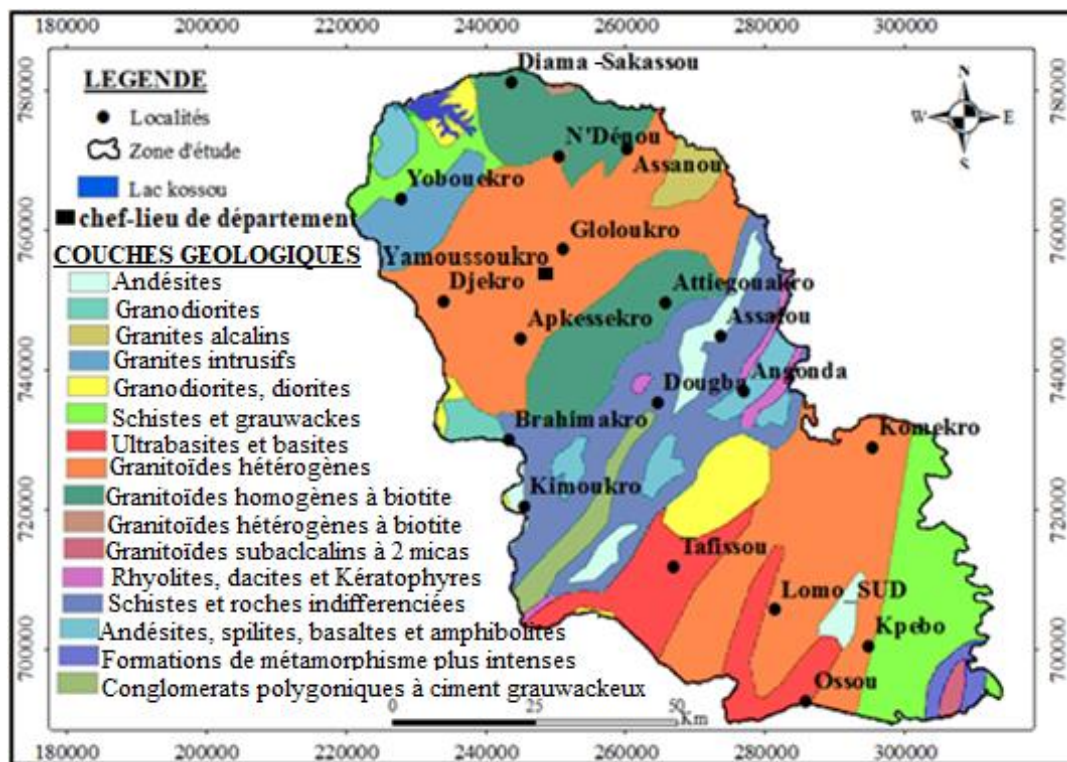


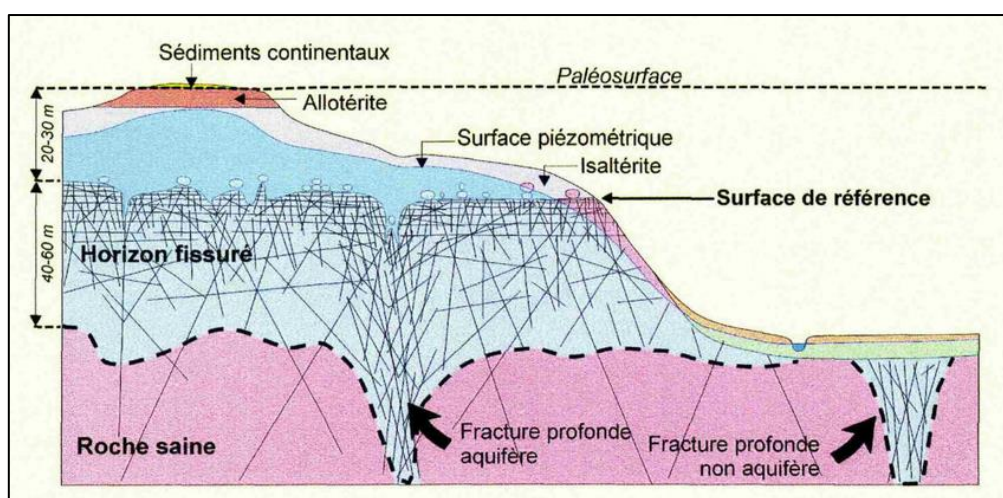
Figure 4 : Carte géologique du département de Yamoussoukro

### 1.1.9 Context hydrogéologique

Le département de Yamoussoukro comporte un aquifère composite, constitué d'altérite et d'une partie fissurée. Les altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Ce sont des formations de surface résultant des

## GENERALITES

processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie et est généralement capté par les paysans à l'aide d'ouvrages appelés puits paysans. Son niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). Les réserves d'eau dans ces réservoirs sont tributaires de la perméabilité et de l'épaisseur de ces altérites. Les aquifères de fissures qui sont sous-jacents aux aquifères d'altérites constituent des réservoirs beaucoup plus importants. Ces aquifères naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre (Sawadogo, 1984). Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2003) dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. La productivité de ces aquifères de fissures est influencée par le faciès lithologique, la présence ou non d'altérites, la conductivité hydraulique des fractures recoupées par les ouvrages (M'bonu, 1991). Par rapport aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières. Pour ces raisons, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités à partir des forages pour l'alimentation en eau des populations. L'hydrogéologie des milieux fissurés a connu ces dernières années un grand essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériels de prospection. Le modèle conceptuel d'aquifère de socle généralement admis est présenté à la figure ci-dessous (Figure 5).



**Figure 5 :** Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Wyns, 1998)

### 1.2 Etat des lieux en matière de potentialité des ressources en eau souterraine

L'objectif assigné à cette recherche de potentialité des ressources en eau souterraine, a toujours été de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer le potentiel aquifère du milieu, afin de gérer au mieux les ressources en eau souterraine. La méthode utilise à cet effet, des

## GENERALITES

outils d'analyse multicritère spatiale intégrés dans un Système d'Information Géographique (S.I.G) (Langevin *et al.*, 1991 ; Savané, 1997 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Dibi, 2008 ; Youan Ta, 2008 ; Koudou, 2013 ; Mangoua, 2013). C'est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes complexes qui incluent des aspects qualitatifs et/ou quantitatifs dans un processus décisionnel (Cirad, 2000). 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 les méthodes d'analyse multicritère visent à chercher une solution acceptable et réaliste, compte tenu de l'environnement du problème dans lequel les critères d'appréciation sont multiples. En effet, l'AMC utilisée conjointement avec le SIG ont permis d'établir des cartes thématiques définissant les zones à fortes potentialités en eau, notamment les secteurs de forte productivité où la ressource est disponible, exploitable et d'accès facile. Ces cartes thématiques sont utiles pour toute activité de développement et d'aménagement du territoire. Les travaux de Biémi (1992) ; Savané (1997) ; Kouamé (1999) ; Jourda (2005) ; Jourda *et al.* (2006) ; Dibi (2008) ; Youan Ta (2008) ; Doumouya *et al.* (2012) en témoignent.

### **1.3 Etat des lieux sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine**

#### **1.3.1 Notion de vulnérabilité**

L'eau souterraine a longtemps été considérée par le grand public comme eau potable. Depuis les années 1970, la détection croissante de contamination dans l'eau souterraine a suscité le développement du concept de vulnérabilité à la pollution des aquifères. Selon la nature et la structure des sols et aquifères le concept de vulnérabilité pourra prendre des formes et des degrés variés de manière à mettre en évidence les capacités de résistances naturelles diverses des milieux (Margat, 1991). La notion de vulnérabilité n'a pas de définition propre ni de technique standard d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines, ce qui rend difficile la comparaison des diverses évaluations (Vrba & Zaporozec, 1994). Cependant, selon Lafrance *et al.* (1989), le concept de vulnérabilité peut se définir à trois niveaux : (i) aptitude d'un système d'eaux souterraines à être contaminé ; (ii) intégration de l'aptitude des eaux souterraines à propager et à conserver la contamination ; (iii) prise en considération des caractéristiques polluantes du contaminant ce qui fait appel aux concepts de normes et de seuils de toxicité.

#### **1.3.2 Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines**

L'étude de la vulnérabilité consiste à évaluer la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques et chimiques du milieu (Murat *et al.*, 2003). La précision de son évaluation dépend essentiellement

## GENERALITES

de la nature, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres importants (Bezalgues *et al.*, 2002). Le terme "évaluation de vulnérabilité" des aquifères regroupe deux niveaux d'évaluation (Murat *et al.*, 2000) :

- la vulnérabilité intrinsèque, qui considère les conditions physiques naturelles de l'aquifère ; c'est-à-dire qu'elle n'intervient qu'au niveau des conditions hydrogéologiques du milieu et sans tenir compte des caractéristiques du contaminant ; considérée comme invariante dans le temps
- la vulnérabilité spécifique, qui fait intervenir non seulement les paramètres naturels, mais également les propriétés du contaminant, des activités humaines ou même des populations à risque. Elle est directement liée aux sources de pollution et ne se caractérise qu'à un instant précis (Schnebelen *et al.*, 2002).

### **1.3.3 Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine**

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone non saturée et les eaux souterraines, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu & Dassargues, 1998). Toutes ces méthodes sont fonction des types d'aquifères de la zone d'étude (aquifères poreux, aquifères de fissures et aquifères karstiques). Quant à la méthode PaPRI, elle est efficace pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de façon ponctuelle car elle s'applique à petite échelle et prend en compte les altérites, le réseau de drainage ainsi que la nature et les épaisseurs des paramètres qui ont souvent été ignorés dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution (Dibi *et al.*, 2015).

**DEUXIEME PARTIE :**  
**MATERIEL ET METHODES**



## MATERIEL ET METHODES

### 2.1 MATERIEL

#### 2.1.1 Données

Les données nécessaires utilisées lors de cette étude :

- Les données hydrogéologiques utilisées ont été fournies par la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) de la zone d'étude. Elles sont constituées des fiches techniques de forages et des essais de pompage qui proviennent 60 forages repartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Les différentes informations qui ont été collectées sur les fiches techniques de forage sont : les épaisseurs d'altérites, débits d'exploitations, niveaux statiques et les profondeurs de forages.
- Les images satellitaires sont constituées du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30 m × 30 m. Il a permis d'élaborer la carte des pentes, la carte du réseau hydrographique et de déterminer la densité de drainage. L'autre image est celle de Landsat Oli 8 enregistrées entre la période du 12/02/2019 au 22/02/2019. Ces images sont ceux de la scène 197-055, et ont pour résolution 30 m × 30 m. Elles ont permis d'établir la carte de fracturation.
- Les données hydro-climatologiques qui ont été fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Il s'agit des données moyennes mensuelles de pluies et des données mensuelles de températures observées dans le département de Yamoussoukro sur la période de 1990 à 2019. Ces données ont permis de tracer le diagramme ombrothermique et de connaître le taux d'infiltration de ce département.

#### 2.1.2 Outils de traitement de données

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

- le tableur Excel 2016 pour le traitement des données hydro-climatique et de forages ;
- le logiciel ArcGIS 10.4.1 pour la production et la combinaison des cartes thématiques.

### 2.2 METHODES

#### 2.2.1 Détermination des zones potentielles de stockage des eaux souterraines du département de Yamoussoukro

##### 2.2.1.1 Elaboration des critères de base

Les indicateurs quantitatifs intervenant dans la cartographie des ressources en eau souterraine peuvent être réunis en trois grands groupes ; Ce sont : la disponibilité, l'exploitabilité et

l'accessibilité (Savané ,1997 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Jourda *et al.*, 2006 ; Kanohin, 2010 ; Mangoua *et al.*, 2014).

### 2.2.1.1.1 Indicateur de disponibilité

L'indicateur de disponibilité traduit la notion de l'existence d'un aquifère et constitue la première condition à connaître avant toute autre activité (Savané, 1997). La carte de disponibilité est réalisée à partir de la combinaison de la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération et l'infiltration efficace. L'infiltration est le paramètre le plus important pour la disponibilité des eaux souterraines (Mangoua, 2013 ; Yao *et al.*, 2016).

#### ➤ Infiltration

L'infiltration efficace représente la frange d'eau qui va alimenter les aquifères. Elle permet d'avoir une estimation de la recharge de l'aquifère. Elle est déterminée à partir des données hydro-climatiques, grâce à l'approche du bilan hydrologique qui s'exprime comme suit :

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

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

Avec :

P : précipitation (mm),

R : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm)

#### ➤ La densité de fracturation

Les zones de très forte densité de fracturation (DF) constituent le pôle favorable à l'existence d'un réservoir potentiel, alors que les zones de densité fracturation nulle ou très faible augurent très défavorablement la présence de réservoir (Jourda, 2005). Le critère densité de fracturation ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) a été élaboré à partir du traitement de la carte de fracturation sur le logiciel ArcGis. La zone d'étude est divisée en grille de  $10 \text{ Km}^2$ . La longueur totale de tous les linéaments dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de fracturation ;

#### ➤ La Pente

La pente (P) est l'un des facteurs contrôlant l'infiltration des eaux souterraines. En effet, avec une faible pente, l'écoulement est faible et permet l'infiltration de l'eau de pluie dans la subsurface, alors qu'une forte pente faciliterait l'écoulement de surface (Prasad *et al.*, 2008). La

carte du critère pente en pourcentage (%) a été élaborée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) grâce au logiciel ArcGIS 10.4.1.

### ➤ **La Densité drainage**

La densité de drainage (DD) caractérise la pluie relative qui pourrait avoir infiltré le sous-sol. Une forte densité de drainage suppose une mauvaise condition de recharge des nappes. Ainsi, moins le réseau hydrographique est dense et plus les nappes sont alimentées (Prasad *et al.*, 2008). L'exploitation du Modèle le Numérique de Terrain sous le logiciel ArcGIS a permis d'établir la carte du réseau hydrographique. La zone d'étude est divisée en grille de 10 km<sup>2</sup>. La longueur totale de tous les drains dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de drainage.

### ➤ **L'épaisseur d'altération**

L'épaisseur d'altération (EA) correspond à la frange superficielle altérée des roches de socle qui renferme des réservoirs appelés aquifères d'altérites. Les altérites représentent le premier lieu de transit des eaux d'infiltration en provenance des précipitations vers les nappes. La généralisation de l'extension de la couverture d'altérites sur toutes les formations indique l'importance de la fissuration (Saley, 2003). Le critère épaisseur d'altération a été élaboré à l'aide des données des fiches techniques de forages, et varie entre 2,64 m et 53,26 m.

#### **2.2.1.1.2 Indicateur d'exploitabilité**

L'indicateur d'exploitabilité dépend du débit d'exploitation et du niveau statique de la nappe. Le débit d'exploitation est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine, mais aussi par la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan Ta *et al.*, 2011).

### ➤ **Le débit de production ou d'exploitation**

Le débit de production (QE) délivré par l'ouvrage est élaboré à partir des données des fiches techniques des 60 forages et des essais de pompages. Le débit minimum recommandé est 1 et 3,5 m<sup>3</sup>/h, respectivement pour l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise améliorée (DHH, 2001). Au niveau du département de Yamoussoukro le débit varie de 0,51 à 18 m<sup>3</sup>/h ;

### ➤ **Le niveau statique**

Le niveau statique permet de suivre la fluctuation du niveau d'eau dans l'aquifère et joue un rôle important dans la délimitation des zones potentielles en eau souterraine (Shankar & Mohan,

2006). Il a été élaboré à partir des données des fiches techniques des 60 forages réalisés. Ce niveau varie entre 2,39 m et 64 m dans les forages.

### 2.2.1.1.3 Indicateur d'accessibilité

L'indicateur d'accessibilité renseigne sur les conditions d'accès à la ressource en eau souterraine. Ces conditions sont considérées comme des facteurs économiques et sociaux car ils favorisent ou non l'accès à la ressource. Les principaux facteurs d'accessibilité sont la profondeur totale et l'indice de succès.

#### ➤ La profondeur totale

La profondeur totale du forage (PF) donne des informations sur le coût du forage, selon le nombre de mètre linéaire foré. Elle indique le débit optimal que l'aquifère considéré est susceptible de fournir. Le critère profondeur de forage a été élaboré à partir des données des fiches techniques de 60 forages et varie entre 50,27 m et 104,84 m.

#### ➤ L'indice de succès

L'indice de succès (IS) donne la probabilité de succès d'un forage et est calculé par la formule suivante (Equation 3) :

$$a = \frac{b}{10} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Où  $a$  est l'indice de succès (%) et  $b$  est le débit d'exploitation ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Selon les recommandations de l'Office Nationale de l'Eau Potable (ONEP), l'indice de succès permet la distinction des zones de bonne productivité caractérisées par des forages positifs ( $a > 10\%$ ) et des zones de faible productivité avec un nombre élevé de forages négatifs ( $a < 10\%$ ) (DHH, 2001). Ainsi un forage avec un indice de succès  $a > 10\%$  est accessible à la population pour exploitation.

### 2.2.1.2 Classification et standardisation des critères

#### 2.2.1.2.1 Classification des critères

La classification des critères est une phase tout aussi délicate et doit être judicieusement bien menée. Le choix des classes tient compte de la variante des données et s'inspire de la classification adoptée au cours des travaux antérieurs (Jourda, 2005 ; Jourda *et al.*, 2006) réalisés en région de socle et de la classification proposée par le Comité inter-africain d'étude hydraulique (CIEH) pour les débits. Ainsi, pour une meilleure interprétation, le nombre de

classe est réduit à 5 comme l'ont proposé divers auteurs (Savané, 1997 ; Saley, 2013 ; Jourda, 2005) : très faible ; faible ; moyenne ; forte ; très forte.

### **2.2.1.2.2 Standardisation des critères**

Les critères étant mesurés sur des échelles différentes, avec des unités différentes, une standardisation de ceux-ci s'impose pour une bonne analyse multicritère. Un intervalle commun de 0 à 10 est retenu pour cette opération tout en tenant compte des études réalisées par Jourda (2005) ; Jourda *et al.* (2006) dans la région de Korhogo. La note 10 est attribuée aux classes très faible ou très forte selon qu'elles contribuent à l'excellente réalisation de l'indicateur considéré. Dans le cas inverse, la note 1 est attribuée à ces classes. En suivant la même logique, les valeurs intermédiaires sont attribuées aux classes intermédiaires selon une distribution linéaire. Pour l'élaboration de chaque indicateur considéré, un certain nombre de critères est retenu. Leur classification et standardisation sont présentées dans les tableaux I et II en annexe 1.

### **2.2.1.3 Pondération des critères**

La pondération consiste à affecter des poids à chaque critère rentrant dans la réalisation d'un indicateur donné. La valeur des poids est relative à l'importance du critère dans l'accomplissement du phénomène que traduit l'indicateur. Dans cette étude, la pondération a été effectuée suivant la méthode de comparaisons par paires selon le processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) développée par Saaty (2008). Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1.

Cette méthode consiste à faire une comparaison par paire des critères d'un indicateur donné, puis à attribuer une note de comparaison (Tableau I) à chaque critère selon leur importance dans la réalisation de l'indicateur donné.

## MATERIEL ET METHODES

**Tableau I :** Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères (El Morjani, 2003)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Note
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Moins important	1/5
Fortement moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9

Les valeurs issues de cette comparaison ont par la suite été intégrées dans un calcul de vecteur propre (Equation 4) et de coefficient de pondération (Equation 5) pour chaque paramètre (Doumouya *et al.*, 2012). Ces valeurs sont consignées dans les tableaux III et IV présentés en annexe 2.

$$Vp_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n N_i} \quad (\text{Eq 4})$$

$Vp_j$  = Vecteur propre de chaque facteur ;  $N_i$  = Valeur de chaque facteur. Le coefficient de pondération ( $Cp_j$ ) de chaque facteur est déterminé comme suit (Equation 5) :

$$W_i = \frac{Vp_j}{\sum_{i=1}^n Vp_j} \quad (\text{Eq 5})$$

$W_i$  = coefficient de pondération de chaque facteur. Sur cette base, des matrices de corrélation ont été élaborées pour chaque sous-critère pour déterminer au niveau de chaque maille la valeur du critère concerné.

### 2.2.1.4 Agrégation des critères

Dans cette étude, la méthode d'agrégation des critères par pondération a été utilisée. Elle consiste à faire la somme des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration d'un indicateur donné. Le résultat final (S) représentant la valeur de l'indicateur est (Equation 6) :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (\text{Eq. 6})$$

Avec S : le résultat ;  $W_i$  le poids du critère i ; et  $X_i$  la valeur standardisée du critère i.

## MATERIEL ET METHODES

L'agrégation par pondération fournit un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10. En effet, la somme des coefficients de pondération générée par la méthode de Saaty (2008) vaut 1. L'établissement de la carte d'un indicateur donné consistera à reporter dans un espace géographique les différentes valeurs issues de la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration dudit indicateur (Youan Ta *et al.*, 2011). Une reclassification des indicateurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes que sont : les classes mauvaise, médiocre, bonne et excellente. Le nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

### 2.2.1.5 Validations des différentes cartes thématiques

Les cartes thématiques réalisées ont été validées par le calcul de l'incertitude (Doumouya *et al.*, 2012 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015). En effet, le mode de validation des cartes thématiques utilisées dans les études antérieures (Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2011) a montré des insuffisances dans le fait qu'il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100% la réalité du terrain, car à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul. Ainsi, le calcul des incertitudes sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs est donné par l'équation suivante :

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$\Delta\bar{X}$  : incertitude sur la moyenne de la série de données ;

$\Sigma$  : écart type de la série de données ;

m : nombre de données.

Un facteur d'expansion (K.) est alors calculé afin de déterminer le niveau de confiance. La détermination de ce paramètre est basée sur le principe statistique de calcul de l'incertitude étendue. Le facteur K permet la définition d'un intervalle de portée suffisante ayant pour but d'avoir dans les résultats une grande confiance. L'expression de ce facteur est la suivante :

$$K = \frac{|E - \bar{X}|}{\sigma} \quad (\text{Eq. 8})$$

K est le facteur d'expansion ; et E correspond à la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de cette série. Les niveaux de confiance des différents paramètres ont été déduits des différentes valeurs de K. Ainsi, K= 1 pour un niveau de confiance de 68 % ; K = 2 pour un niveau de confiance de 95 % et K = 3 pour une confiance de 99 %.

### **2.2.2 Cartographie des zones vulnérables à la pollution des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro à partir de la méthode PaPRI**

#### **2.2.2.1 Choix de la méthode**

La méthode PaPRI, utilisée dans cette étude, se présente comme une méthode innovante dérivée de la méthode PaPRIKa appliquée en milieu karstique. La force de cette méthode réside dans le rôle important qu'elle apporte à la couverture protectrice. En effet, tout comme dans la méthode PaPRIKa, l'évaluation de la couverture protectrice (P) repose en plus de la texture, sur l'épaisseur des paramètres de protection (Sol, Zone non saturée et réservoir) (Dorfliger & Plagnes., 2009). De plus, elle prend en compte les altérites, le réseau de drainage ainsi que la nature et les épaisseurs des paramètres qui ont souvent été ignorés dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution (Dibi *et al.*, 2015) mais aussi à cause de l'importance des paramètres utilisés et sa conception spéciale pour l'évaluation de la vulnérabilité en milieu de socle fissuré. PaPRI dont l'acronyme signifie « Protection des aquifères basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration » est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du socle. Elle est développée à partir de la méthode PaPRIKa (Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification), qui est une méthode multicritère à index avec système de pondération dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques (Dorfliger & Plagnes., 2009). L'absence de l'épikarst conduit à la limitation du nombre de critère à trois (3) contre quatre (4) pour PaPRIKa (Dibi *et al.*, 2015).

#### **2.2.2.2 Définition des critères**

##### **- Critère Protection (P)**

Le critère P représente tous les facteurs qui contribuent à la protection de la nappe face à l'infiltration. Il caractérise l'aptitude à réduire le transport des polluants et leur vitesse de transfert depuis la surface vers la nappe. Il dépend principalement de la nature et de l'épaisseur du sol (S), des altérites (A) et de la zone non saturée (ZNS) ainsi que de la fracturation de celle-ci (Dibi *et al.*, 2015).

Le paramètre "sol" est basé sur l'épaisseur et la nature de sol décapé avant la foration. Pour les terrains d'épaisseurs de sol supérieures à 40 cm, la cotation attribuée est 1. Ensuite, les terrains d'épaisseurs de sol moyennes ou fortes avec des valeurs qui varient de 0 à 10 cm et de 10 à 40 cm sont cotés respectivement 3 et 2. Par contre, pour un terrain sans sol, l'on donnera la cotation 4.



## MATERIEL ET METHODES

Le paramètre "altérite" est choisi en fonction de l'épaisseur d'altérites traversée. La cotation 4 est attribuée aux faibles épaisseurs et la cotation 1 pour les épaisseurs supérieures à 30 m. La cotation 2 et 3 est attribuée aux épaisseurs intermédiaires dont les valeurs sont comprises entre 5 et 30m.

Le paramètre "zone non saturée" consiste à attribuer aux granites fissurés la cotation 2 et la cotation 3 aux schistes fissurés. L'ensemble de ces critères est présenté dans le tableau II.

**Tableau II** : Classification et standardisation des paramètres de protection (P)  
(Dibi *et al.*, 2015).

Critères	Paramètres	Qualificatifs du paramètre	Classes	Notes
Protection (P)	Sol (argilo sableux)	Faible	Pas de sol	4
		Moyen	0 - 10 cm	3
		Fort	10 – 40 cm	2
		Très fort	>40 cm	1
	Altérites (m)	Faible	0 – 5 m	4
		Moyen	5 – 15 m	3
		Fort	15 – 30 m	2
		Très fort	>30 m	1
	Zone non saturée	Schistes fissurés		3
		Granites fissurés		2

### - Critère Réservoir (R)

Le critère R désigne la nature géologique du réservoir aquifère caractérisée par la lithologie et la fracturation (Dörfliger & Plagnes., 2010). Il est spatialisé à partir des cartes géologiques, des observations de terrain, des données sur la nature lithologique et des coupes de forages. Ce critère est évalué en considérant la nature (lithologie) des formations géologiques qui constituent les nappes souterraines et la densité de fracturation de ces formations aquifères.

La nature de la "roche réservoir" caractérise le degré de perméabilité. La cotation 4 correspond aux zones de grands accidents ou de méga-fractures ouvertes et la cotation 2 pour les granites fissurés rencontrés juste au-dessus de la roche saine. Ensuite, la cotation 1 est donnée aux formations géologiques constituées de gneiss fissurés rencontrés juste au-dessus de la roche saine. Enfin, les roches meubles constituées de sables grossiers, sables argileux, etc., prennent la cotation 3.

La "densité de fracturation" est tirée de la carte de fracturation détaillée du département en faisant un maillage. La longueur totale de toutes les fractures dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de fracturation. Ainsi, la cotation de la densité

## MATERIEL ET METHODES

de fracturation en fonction des classes standardisées se fait comme suit : les faibles densités de fracturation ( $1,3 - 1,9 \text{ km/km}^2$ ) prennent la note 1 par contre la note 4 est donnée aux plus fortes densités de fracturation (supérieures à  $3,3 \text{ km/km}^2$ ). Les classes de densité de fracturation intermédiaires ( $1,9 - 2,7 \text{ km/km}^2$  et  $2,7 - 3,3 \text{ km/km}^2$ ) ont respectivement les notes 2 et 3 (Tableau III).

**Tableau III** : Classification et standardisation des paramètres de réservoir (R)  
(Dibi *et al.*, 2015).

Critères	Paramètres	Qualificatifs du paramètre	Classes	Note
Réservoir (R)	Nature de la roche	Très forte	Les zones de grands accidents ou de Mega fractures ouvertes	4
		Forte	Roches meubles constituées de sables grossiers, sable argileux	3
		Moyenne	Schistes fissurés rencontrés juste au-dessus de la roche saine	2
		Faible	Granites fissurés rencontrés juste au-dessus de la roche saine	1
	Densité de fracturation ( $\text{km/km}^2$ )	Faible	1,3 – 1,9	1
		Moyen	1,9 – 2,7	2
		Fort	2,7 – 3,3	3
		Très fort	> 3,3	4

### - Critère Infiltration (I)

Ce critère concerne les conditions d'infiltration. Cette infiltration est fonction de plusieurs paramètres qui pourraient soit l'accélérer soit la retarder en fonction de leur nature. Cette infiltration est conditionnée par deux critères importants que sont la pente et la densité de drainage. L'importance de ces deux paramètres a déjà été signalée dans les travaux de Sinan & Razack (2008).

La carte des "pentes" est déterminée à partir de la carte du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude. Les pentes dont les valeurs sont supérieures à 50 % sont cotées 1 et la cotation 4 est attribuée aux plus faibles pentes de valeurs comprises entre 0 et 5%.

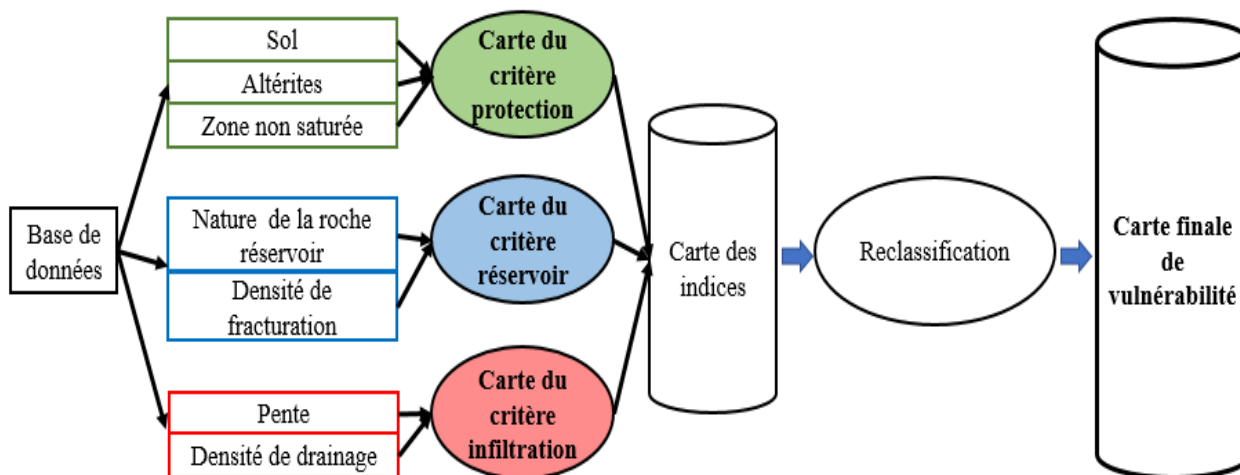
La "densité de drainage" est obtenue grâce au réseau hydrographique, lequel est extrait de la carte du MNT. La longueur totale de tous les drains dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de drainage. L'évaluation de la densité de drainage obéit tout comme les autres à la classification standardisée. Il ressort de cette classification que la

cotation 1 est attribuée aux densités de drainage supérieures à 1,23 km/km<sup>2</sup>. Cependant, les plus faibles classes allant de 0,54 à 0,71 km/km<sup>2</sup> prennent la cotation 4 tandis que les autres classes de densité de drainage sont cotées 2 et 3 (Tableau IV).

**Tableau IV** : Classification et standardisation des Paramètres d’Infiltration (I)  
(Dibi *et al.*, 2015).

Paramètre	Critères	Qualificatifs du critère	Classes	Note
Infiltration (I)	Pente (%)	Faible	0 - 5 (%)	4
		Moyen	5 - 15 (%)	3
		Fort	15 - 50 (%)	2
		Très fort	> 50 (%)	1
	Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	Faible	0,54 – 0,71	4
		Moyen	0,71 – 0,93	3
		Fort	0,93 – 1,23	2
		Très fort	> 1,23	1

La synthèse des différents critères ainsi présentés contribue à l’élaboration de l’indice final de vulnérabilité (Figure 6)



**Figure 6** : Etapes de l’élaboration de la carte de vulnérabilité (Mangoua *et al.*,2020).

### 2.2.2.3 Détermination des coefficients de pondération

La détermination du coefficient de pondération a été exposée dans les paragraphes précédents (cf. paragraphe 2.2.1.3). Selon la méthode PaPRI, il est déterminé sur une échelle numérique de neuf niveaux définis par El Morjani et modifiée par Mangoua *et al.* (2018) pour avoir 5 niveaux comme le montre le tableau V.

**Tableau V** : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de facteurs de Saaty modifié par Mangoua *et al.* (2018)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Note
Moins important	1/3
Légèrement moins important	1/2
Même importance	1
Légèrement plus important	2
Plus important	3

Sur la base du calcul du vecteur propre et du coefficient de pondération, des matrices de corrélation ont été élaborées pour chaque sous-critère pour déterminer au niveau de chaque maille la valeur du critère concerné. Ces valeurs sont consignées dans le tableau V présenté en annexe 2.

#### 2.2.2.4 Détermination de l'indice de vulnérabilité

Le calcul de l'indice de vulnérabilité globale permet l'estimation des contours des zones de protection. Selon Kavouri *et al.* (2011), le facteur le plus important pourrait être l'infiltration (I) car une importante infiltration serait responsable d'un fort risque de dégradation de la qualité des eaux souterraines en ces endroits. Pour la méthode PaPRI, les critères pris en compte sont la protection de l'aquifère (P), la nature de la roche (R) et l'infiltration (I). La détermination de l'indice de vulnérabilité se fait donc selon l'Equation 9 :

$$Vg = iI + pP + rR \quad (\text{Eq. 9})$$

Avec I, P et R, les différents critères ; i, r et p, les poids de ces critères et Vg, l'indice de vulnérabilité.

#### 2.2.2.5 Détermination des différentes classes de vulnérabilité

Cinq classes de vulnérabilité ont été déterminées et représentées par cinq couleurs qui indiquent le degré d'indice des critères en chaque point de la zone d'étude. Il s'agit de la couleur bleue pour la classe 0 indiquant un très faible indice, la couleur verte pour la classe 1 indiquant un faible indice, La couleur jaune pour la classe 2 indiquant un indice intermédiaire (modéré), la couleur marronne pour la classe 3 représente un indice élevé et la couleur rouge pour la 4ème classe indiquant un indice très élevé (Tableau VI).

**Tableau VI** : Classification de la vulnérabilité selon (Dörfliger & Plagnes, 2009).

Indice de vulnérabilité	Classe	Degré de vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Elevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

### 2.2.2.6 Validation de la carte de vulnérabilité

L'estimation de la vulnérabilité est un outil important, mais il est nécessaire de déterminer quelle est la qualité de l'information obtenue à partir de la carte de vulnérabilité. Le recours aux méthodes géostatistiques permet une analyse rigoureuse de l'information et l'utilisation à bon escient des résultats obtenus (Murat, 2000). Dans la présente étude, les marges d'erreurs ont été utilisées pour vérifier la fiabilité de la carte de vulnérabilité. Le calcul des marges d'erreurs nécessite d'abord la détermination des incertitudes sur les indices moyens des différents critères qui constituent la méthode (Dibi *et al.*, 2013). L'incertitude est évaluée à partir de l'équation 10. (Doumouya *et al.*, 2012) :

$$\Delta\bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m |(x_i - \bar{x})|^2} \quad (\text{Eq.10})$$

Avec

- $\Delta\bar{x}$  : Incertitude sur l'indice moyen de chaque paramètre ;
- $\sigma$  : Ecart-type des indices de vulnérabilité du paramètre hydrogéologique ;
- $m$  : Nombre de forages considérés ;
- $x_i$  : Indice de vulnérabilité du paramètre hydrogéologique au forage  $i$  ;
- $\bar{x}$  : Indice de vulnérabilité moyen du paramètre hydrogéologique.

A partir de l'incertitude déterminée sur chaque paramètre, la marge d'erreur proprement dite est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_r = \frac{\sum \Delta\bar{x}}{I_{V-M}} \quad (\text{Eq.11})$$

Avec  $I_{V-M}$  l'indice de vulnérabilité moyen pour chaque paramètre.

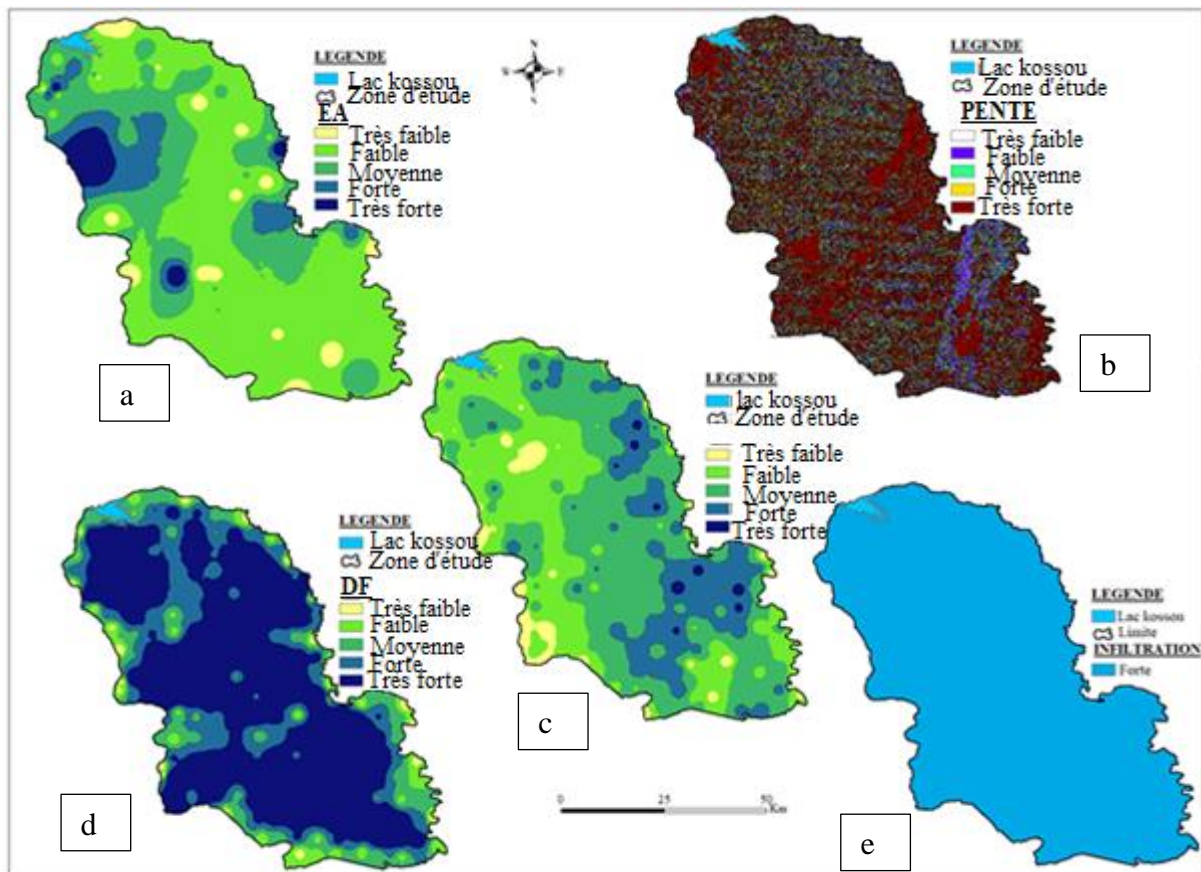
**TROISIEME PARTIE :**  
**RESULTATS ET DISCUSSION**

### 3.1 Résultats

#### 3.1.1. Potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro

##### 3.1.1.1. Disponibilité des ressources en eau souterraine du département

La réalisation de la carte de disponibilité des ressources en eau souterraine a nécessité la réalisation des cartes dites intermédiaires des différents paramètres de celle-ci. La superposition de ces différentes cartes présentées à la figure 7, nous donne la carte de disponibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro.



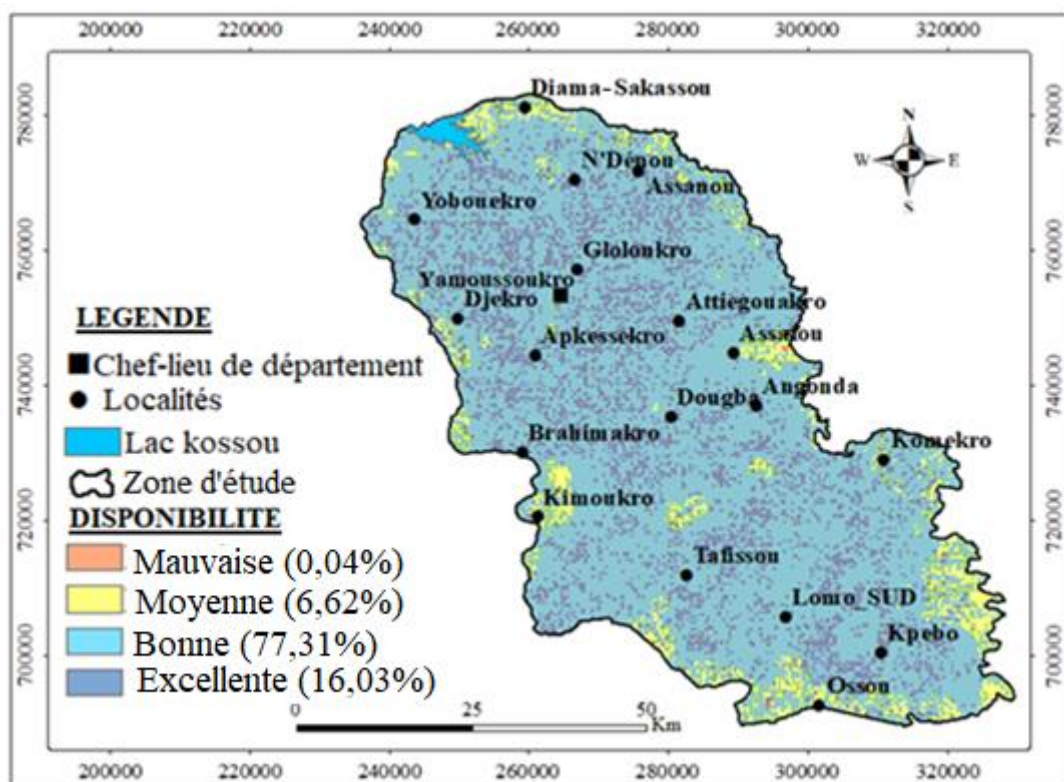
**Figure 7 :** Cartes des paramètres de l'indicateur de disponibilité : (a) épaisseur d'altérations, (b) pente, (c) densité de drainage, (d) densité de fracturation et (e) infiltration

La carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro obtenue à partir de la figure 7, est caractérisée par quatre classes (Figure 8). L'analyse et l'interprétation de ces classes indiquent que :

- la classe à disponibilité mauvaise est quasiment inexistante sur le département avec seulement 0,04% d'occupation. Elle est présente aux extrémités Nord, Sud et Est de la zone d'étude ;

## RESULTATS ET DISCUSSION

- la classe à disponibilité moyenne est caractérisée par une densité de fracturation et une épaisseur d'altération faible. Cette classe qui se retrouve aux alentours de presque toute la zone, essentiellement granitique recouvre 6,64% de la zone d'étude ;
- les zones à bonne et excellente disponibilité occupent respectivement 77,31% et 16,03% de la superficie du département. La classe de disponibilité bonne est sur presque toute la zone et celle de la disponibilité excellente se retrouve disséminée sur l'ensemble du département. Ces zones à bonne et excellente disponibilité en eau sont caractérisées par des pentes relativement faibles, une forte densité de fracturation et une densité drainage modérément faible.



**Figure 8 :** Carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro

Les incertitudes calculées sur les paramètres d'évaluation de la disponibilité en eau souterraine varient de  $\pm 0,1$  à  $\pm 1,04$  (Tableau VII). On constate que dans l'ensemble, les erreurs commises dans l'élaboration de cette carte sont minimales à l'exception de celle de l'épaisseur d'altération. Le niveau de confiance obtenu cependant est très significatif pour les critères retenus dans l'évaluation de l'indicateur de disponibilité en eau. La carte de disponibilité des eaux souterraines à une marge d'erreur de  $\pm 0,1$  avec un niveau de confiance de 95%. Cela signifie que la carte de disponibilité en eau souterraine reflète les réalités du terrain.



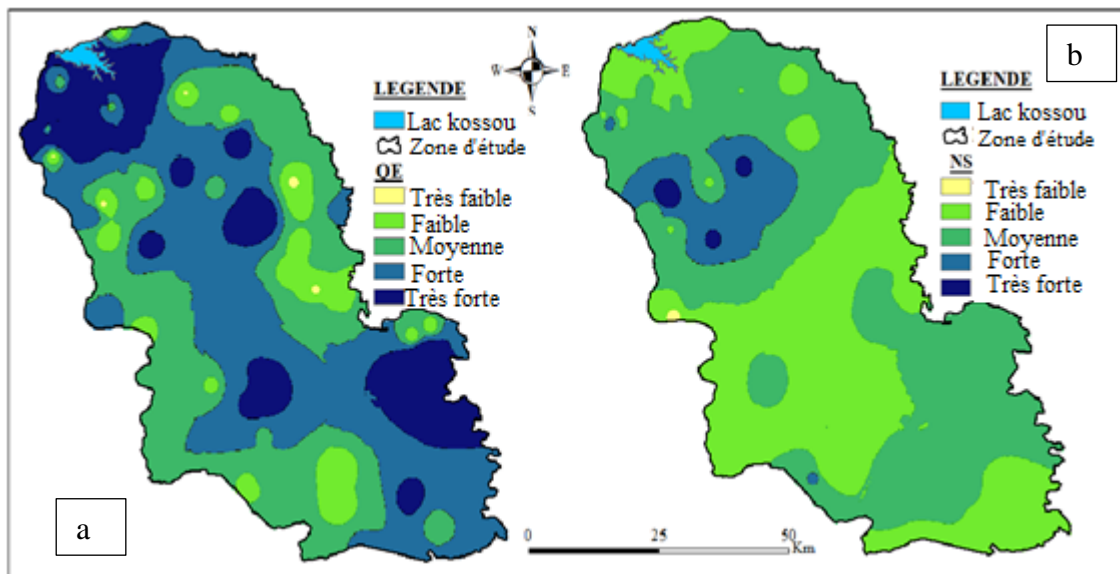
## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau VII : Statistique des paramètres de disponibilité en eau souterraine**

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC
Pente	0	69,36	4,33	3,99	±0,5	1	68%
DD	0,03	23,38	11,4	3,8	±0,4	2	95%
DF	0,18	45,59	21,71	7,28	±0,9	2	95%
EA	1,92	54,7	20,33	8,1	±1,04	2	95%
Infiltration	0	80,2	1,1	5,1	±0,6	1	68%
Disponibilité	4,3	8,1	6,01	0,8	±0,1	2	95%

### 3.1.1.2. Exploitable des ressources en eau du département

La figure 9 présente les différentes cartes thématiques qui ont abouti à la carte de l'indicateur d'exploitabilité des eaux souterraines.



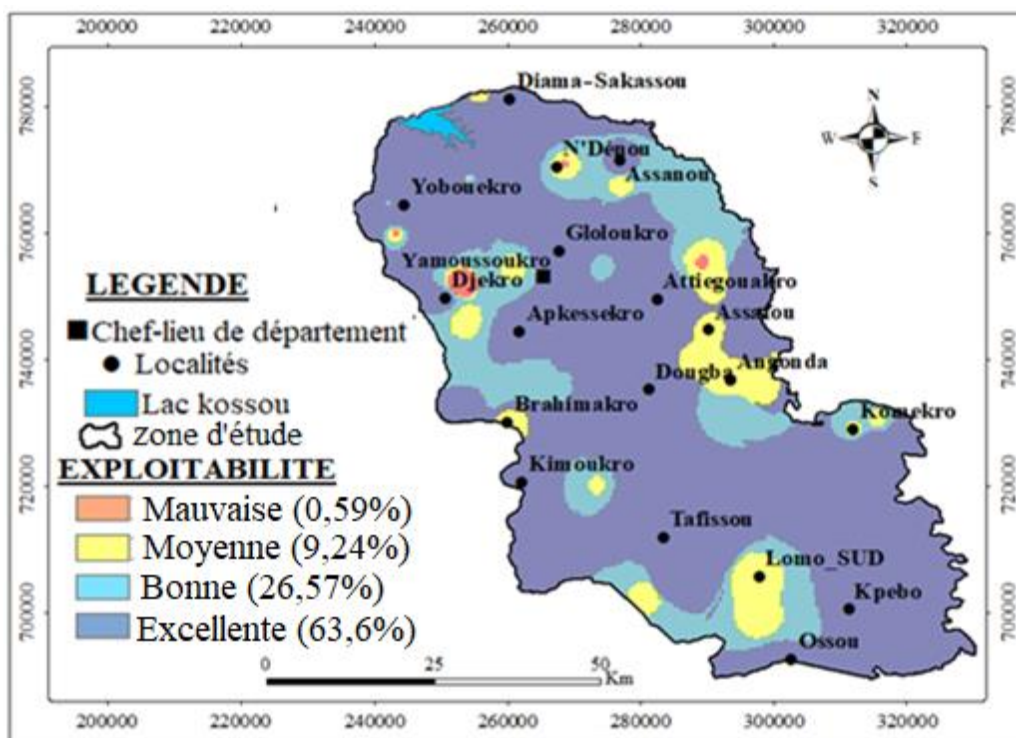
**Figure 9 :** Cartes des paramètres de l'indicateur d'exploitabilité en eau souterraine : (a) débit d'exploitation et (b) niveau statique.

L'analyse et l'interprétation des différentes classes issues de la carte d'exploitabilité révèlent à travers la figure 10 que :

- la classe mauvaise exploitabilité occupe 0,59% de la superficie du département, et celle l'exploitabilité moyenne représente 9,24% du département. Ces classes, caractérisées par les débits d'exploitations très faibles et faibles se retrouvent sous forme de poches, de part et d'autres de la zone d'étude ;
- la classe à bonne exploitabilité est caractérisée par des débits moyens accompagnés de niveaux statiques relativement moyenne (15 - 25 m). Elle occupe 31,54% de la zone d'étude et apparaît essentiellement dans les secteurs Sud, Est et Ouest ;

## RESULTATS ET DISCUSSION

- la classe à exploitabilité excellente est la plus représentative du département avec une proportion d'occupation estimée à 58,63%. Cette classe occupe la majeure partie du département. Elle est caractérisée par les débits d'exploitations très fortes et fortes.



**Figure 10 :** Carte d'exploitabilité des ressources en eaux souterraines du département de Yamoussoukro

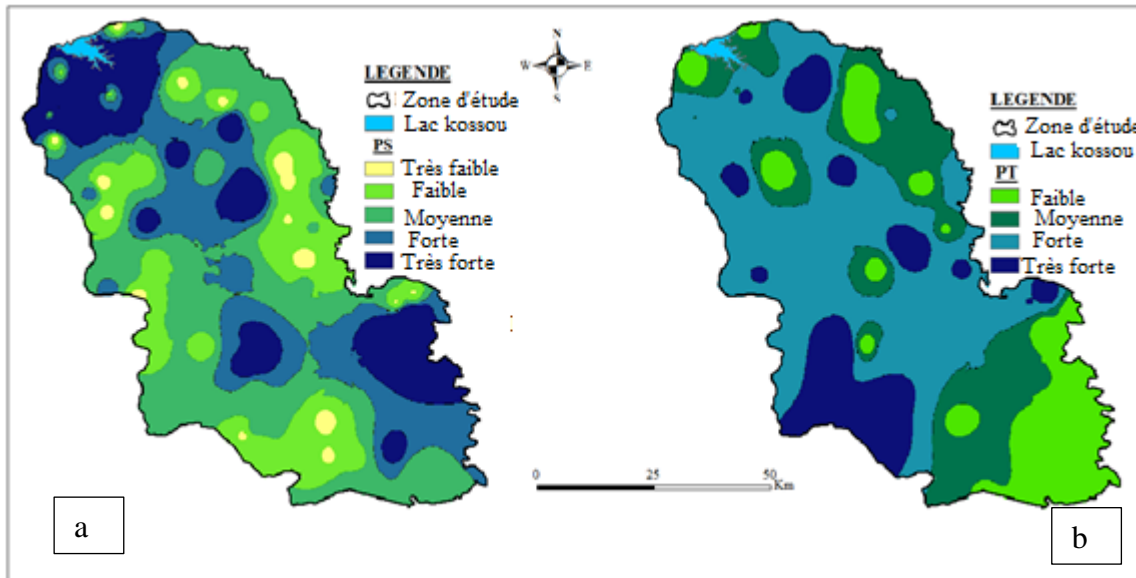
Les paramètres utilisés pour l'exploitabilité ont une incertitude de  $\pm 0,4$  pour le débit d'exploitation et  $\pm 0,7$  pour le niveau statique, avec respectivement un niveau de confiance de 68% et 95% (Tableaux VIII). La carte d'exploitabilité a une marge d'erreur de  $\pm 0,1$  avec un niveau de confiance de 99%. Ces valeurs impliquent une fiabilité de la carte thématique d'exploitabilité en eau souterraine.

**Tableau VIII :** Statistique des paramètres d'exploitabilité en eau souterraine

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC
NS	2,45	63,71	16,67	5,96	$\pm 0,7$	2	95%
DE	0,51	35,89	6,18	3,45	$\pm 0,4$	1	68%
Exploitabilité	1	8,75	6,7	1,49	$\pm 0,1$	3	99%

### 3.1.1.3. Accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro résulte de l'association des cartes d'indice ou de probabilité de succès et de la profondeur total de forage (Figure 11).



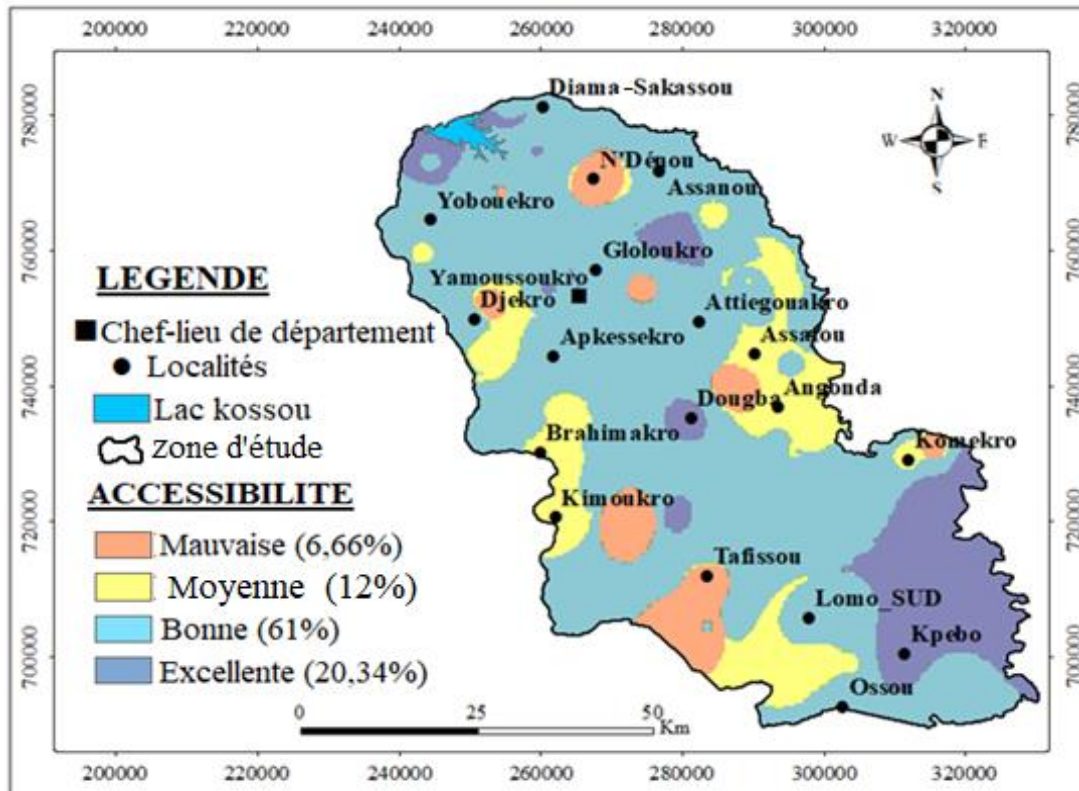
**Figure 11** : Cartes des paramètres de l'indicateur d'accessibilité en eaux souterraines : (a) Probabilité de Succès et (b) Profondeur Totale

La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du département est caractérisée par quatre classes d'inégale répartition (Figure 12). L'analyse et l'interprétation de ces différentes classes indiquent que :

- la classe à accessibilité mauvaise aux ressources en eau ne couvre que 6,66% du département. Elle est répartie sous forme de poche sur la quasi-totalité de la zone. La plus grande plage est au Sud plus précisément dans la localité de Tafissou. C'est une zone à forages très profonds avec des débits faibles.
- les zones à accessibilité moyenne représentent 12% du département et sont localisées dans les parties Ouest, Est, Sud-ouest et les extrémités Est du département de Yamoussoukro ;
- la classe à bonne accessibilité représente 61% de la zone. Elle couvre en grande partie la superficie de la zone d'étude. Cette classe est caractérisée par des forages à profondeurs moyennes accompagnées d'un indice de succès relativement fort (> 60 %) ;
- la classe à excellente accessibilité ne couvre que 20,34% de la zone. Cette classe répartie en poche, se localise en grande partie au Sud-est dans la localité de Kpebo. Les autres poches sont réparties au Centre dans celle de Dougba et aussi dans quelques localités

## RESULTATS ET DISCUSSION

du Nord. Elle est caractérisée par des profondeurs faibles et moyennes et des indices de succès très élevés (> 80%). La zone d'étude présente une accessibilité bonne et excellente de 81,34%.



**Figure 12 :** Carte d'accessibilité en eaux souterraines du département de Yamoussoukro

La carte d'accessibilité a une marge d'erreur de 0,1 avec un niveau de confiance de 99 %. Les marges d'erreurs sur la profondeur et l'indice de succès sont respectivement de  $\pm 0,9$  et  $\pm 4$  (Tableau IX). Leurs niveaux de confiances respectifs sont 99% et 68%.

**Tableau IX :** Statistique des paramètres d'accessibilité en eaux

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC
PS	5,17	358,91	61,83	34,5	$\pm 4$	1	68%
PT	50	105,28	74,49	7,4	$\pm 0,9$	3	99%
Accessibilité	1	8	5,49	1,37	$\pm 0,1$	3	99%

### 3.1.1.4. Carte des sites potentiels en eau souterraine

La combinaison linéaire des facteurs quantitatifs (disponibilité, exploitabilité et accessibilité) basée sur leurs poids respectifs a permis d'obtenir la carte des zones potentielles en eau souterraine du département de Yamoussoukro. La figure 13 montre que le département est dominé par les classes bonne et excellente. Ces classes représentent 66% de la zone et se

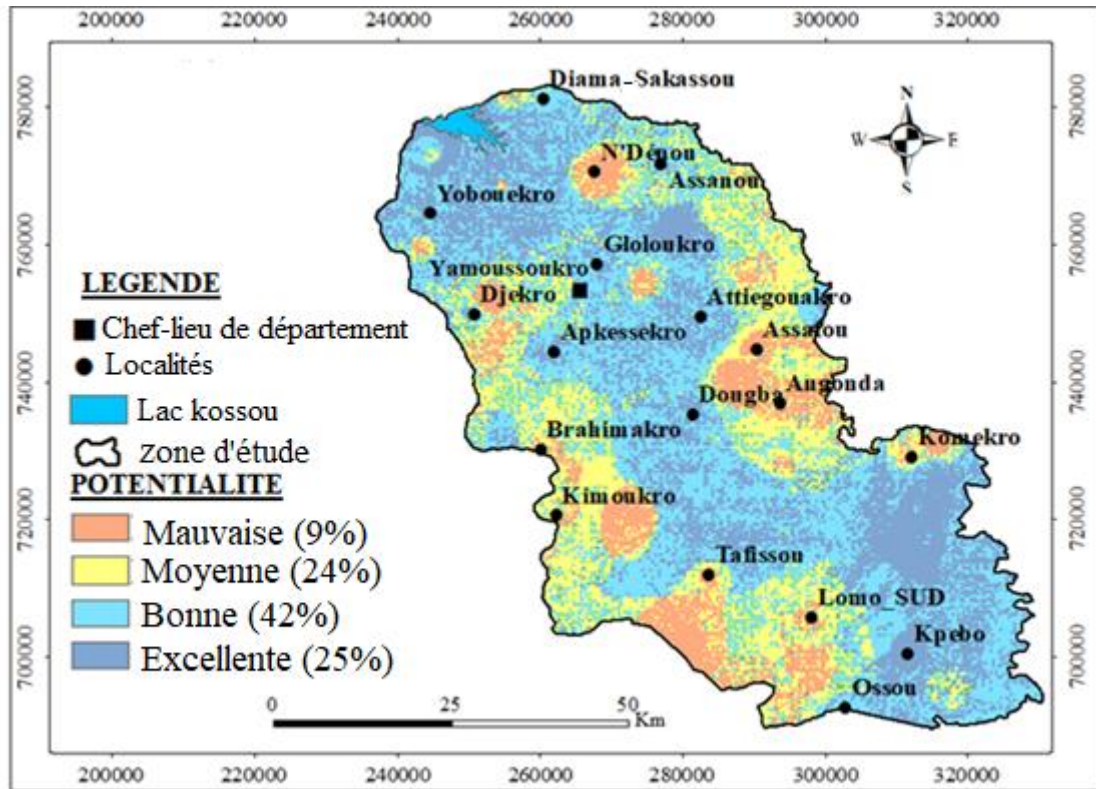
## RESULTATS ET DISCUSSION

rencontrent sur la quasi-totalité du département excepté des plages de classes médiocre et mauvaise occupant 34%, disséminées depuis les extrême gauche Nord aux Sud, et aussi de l'extrême droit Nord à l'Est. Ces classes se rencontrent par endroit vers le Centre et le Sud.

L'analyse et l'interprétation de ces différentes classes révèlent que :

- la classe des mauvaises potentialités est représentée par une proportion de 9%. Il s'agit des zones de disponibilité et d'accessibilité mauvaises ou moyenne auxquelles peut s'ajouter une mauvaise exploitabilité. Elle est fortement représentée dans les localités d'Assanou, et de N'denou ;
- la classe des zones à potentialités moyenne couvre 25% du périmètre d'étude et occupe les zones de disponibilité et d'accessibilité médiocre auxquelles s'ajoute quelquefois une bonne exploitabilité ;
- la classe des bonnes potentialités en eau couvre une bonne surface de la zone d'étude. Cette classe occupant près de 42% du secteur se trouve disséminée sur tout le périmètre d'étude. Dans ces zones, les ouvrages sont moins profonds et à succès probable. La ressource en eau est disponible avec une pente relativement faible qui permet une bonne recharge de la nappe ;
- la classe à excellente potentialité a une proportion de 24%. Elle se rencontre essentiellement dans la partie Sud. On la retrouve également disséminée sur l'ensemble du département.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 13 :** Carte des potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro

L'erreur sur la carte des potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro est de  $\pm 0,09$  avec un niveau de confiance de 99 %. Elle est la somme des cartes de disponibilité, d'exploitabilité et d'accessibilité. L'erreur sur chacune de ces trois (3) cartes est respectivement  $\pm 0,16$  ;  $\pm 0,19$  ;  $\pm 0,17$  (Tableau X).

**Tableau X :** Statistique des indicateurs de potentialité

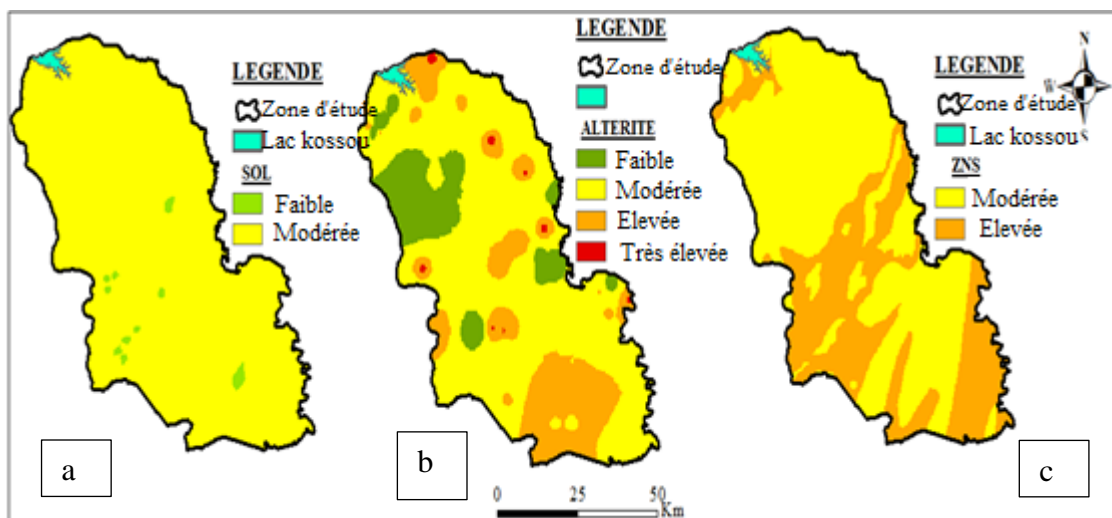
Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC
Disponibilité	4,3	8,1	6,01	0,8	$\pm 0,16$	2	95%
Exploitabilité	1	8,75	6,7	1,49	$\pm 0,19$	3	99%
Accessibilité	1	8	5,49	1,37	$\pm 0,17$	3	99%
POTENTIALITE	3,37	8,11	6,06	0,75	$\pm 0,09$	3	99%

### 3.1.2. Zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro.

#### 3.1.2.1. Cartes thématiques des paramètres de la vulnérabilité

##### 3.1.2.1.1. Carte thématique du critère Protection

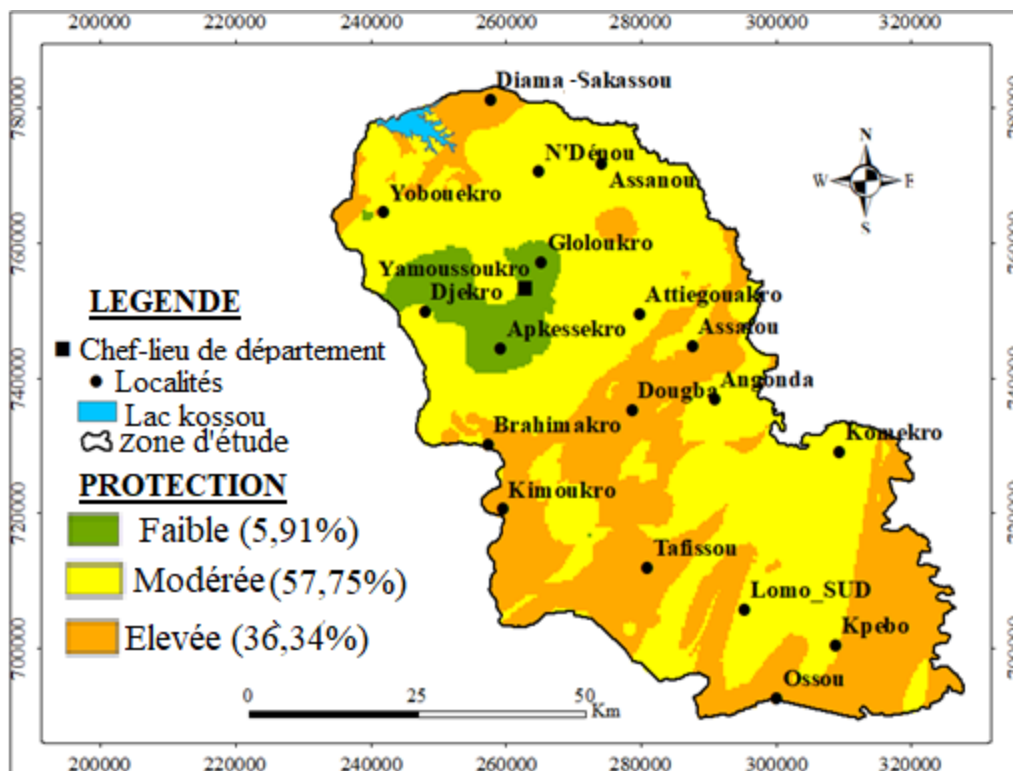
La carte Protection rassemble tous les éléments susceptibles d'empêcher ou de retarder toute infiltration de pollution dans le réservoir. Ce critère prend en compte la combinaison de trois paramètres à savoir : les cartes des paramètres sol, altérites et de la zone non saturée présentées à la figure 14.



**Figure 14 :** Cartes des paramètres de la protection : (a) Indice de protection du sol ; (b) Indice de protection des altérites ; (c) Indice de protection de la zone non saturée.

La carte thématique du critère protection proprement dite, fait ressortir trois classes d'indice de protection (faible, modérée, et élevée). La zone d'étude est dominée par la classe de protection modérée et élevée (Figure 15) qui occupent respectivement 57,75% et 36,34 de la superficie de la zone d'étude. Ces deux classes se partagent la quasi-totalité de la zone. La classe jugée de protection faible occupe le reste de la zone avec 5,91% de proportion. Elle se rencontre uniquement au Nord-Ouest du département.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 15 :** Carte thématique du critère protection

La carte de protection des eaux souterraines à une marge d'erreur de 2,3%. Les paramètres sol, altérite et zone non saturée ont respectivement les valeurs d'incertitudes de  $\pm 0,04$  ;  $\pm 0,07$  et  $\pm 0,05$  (Tableau XI).

**Tableau XI :** Statistique des paramètres de protection

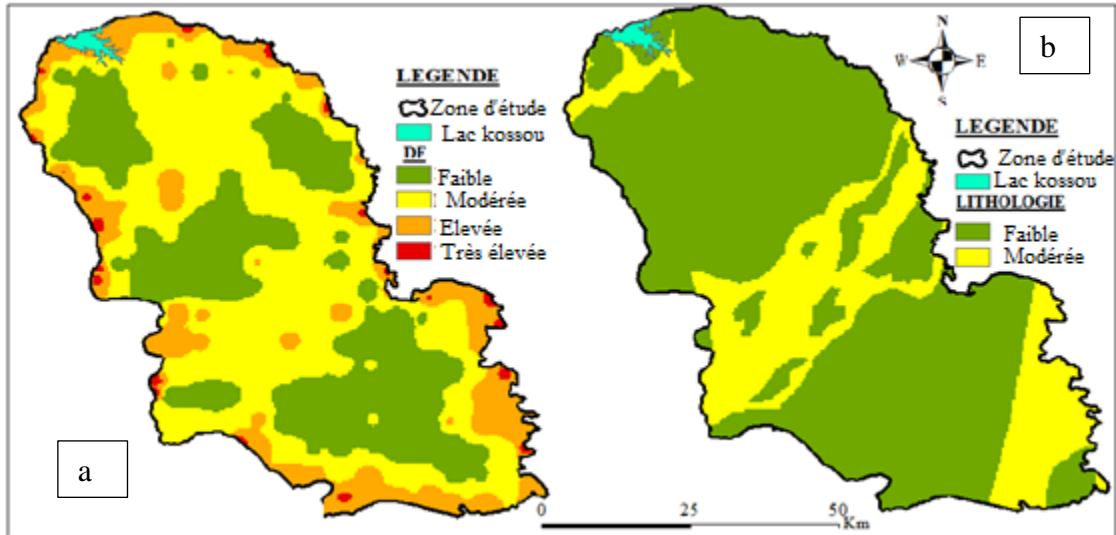
Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude
Sol	1	2,25	2,09	0,29	$\pm 0,04$
Altérite	1	4	2,09	0,58	$\pm 0,07$
ZNS	1,62	3	2,34	0,45	$\pm 0,05$
Somme	$I_{v-m} = 6,52$			$\sum \Delta \bar{x} = 0,17$	
Erreur	Er=2,3%				

### 3.1.2.1.2. Carte thématique du critère roche ou réservoir

La carte du critère roche (R) est le résultat de la combinaison des cartes des critères nature de la roche et densité de fracturation (Figure 16).



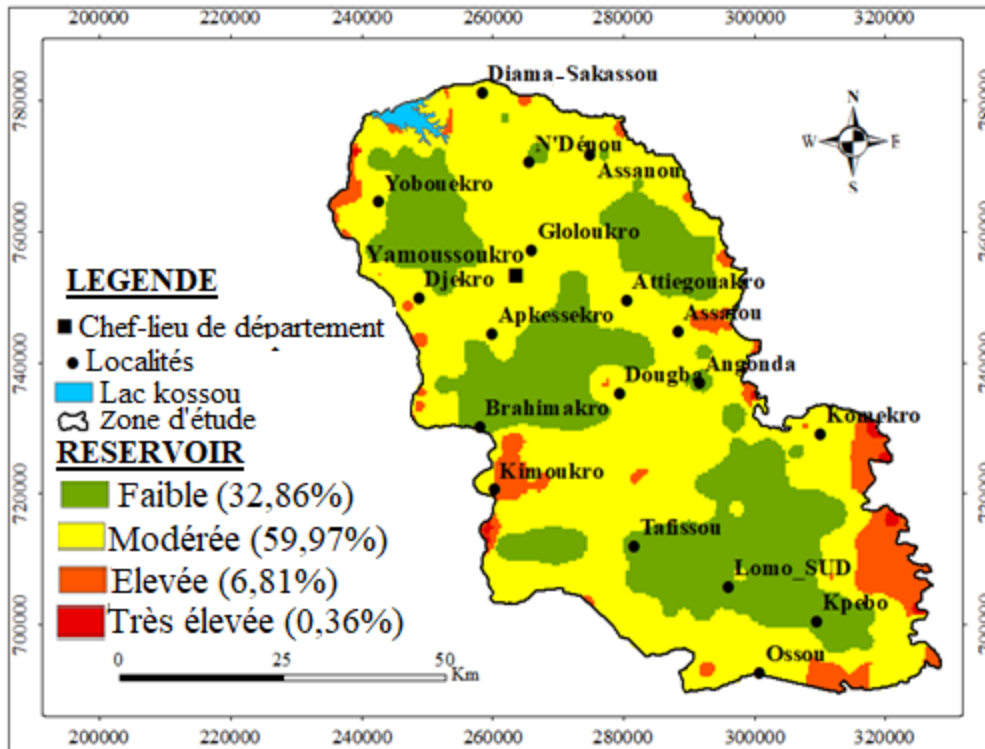
## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 16 :** Cartes des paramètres du réservoir : (a) densité de fracturation, (b) nature de la roche ou lithologie

Le critère Réservoir représente le critère le moins important dans l'évaluation en termes de protection de l'aquifère. Pour ce critère, plus le degré de perméabilité est fort plus l'aquifère est vulnérable. L'analyse des résultats du facteur roche (Figure 17) montre que le département est dominé par les classes de perméabilité modérée (59,97 %) et faible (32,86%) qui se rencontrent sur l'ensemble du département excepté les alentours de la zone et deux point du Centre, qui sont marqués par les classes de perméabilités élevée et très élevée. Rencontrées, respectivement dans les formations métamorphiques d'origine sédimentaire ou volcanique et dans les terrains cristallins anciens indifférenciés, les classes de perméabilité élevée et très élevée, s'étendent sur 7,17 % de la zone d'étude.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 17 :** Carte thématique du critère roche ou réservoir

La carte du critère réservoir des eaux souterraines du département de Yamoussoukro a une marge d'erreur de 4,5%. Les paramètres densité de fracturation et lithologie de la roche ayant servi à sa conception ont des valeurs d'incertitudes respectives de  $\pm 0,09$  et  $\pm 0,05$  (Tableau XII).

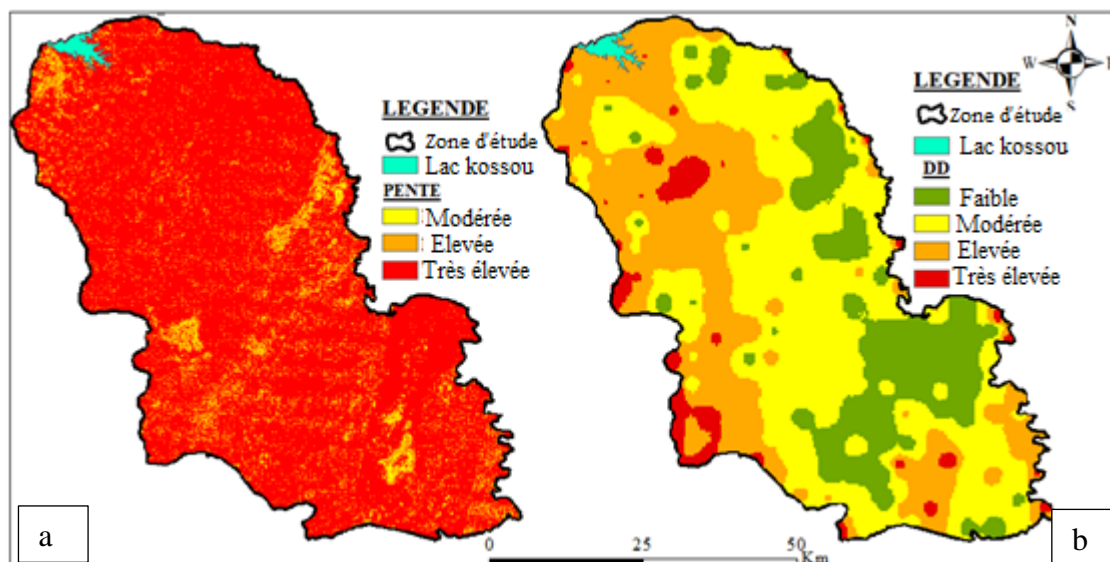
**Tableau XII :** Statistique des paramètres du reservoir

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude
DF	1	2,25	2,09	0,29	0,04
Lithologie	1	4	2,09	0,58	0,07
Somme	$I_{v-m} = 3,11$			$\sum \Delta \bar{x} = 0,14$	
Erreur	Er = 4,5%				

### 3.1.2.1.3. Carte thématique du facteur Infiltration

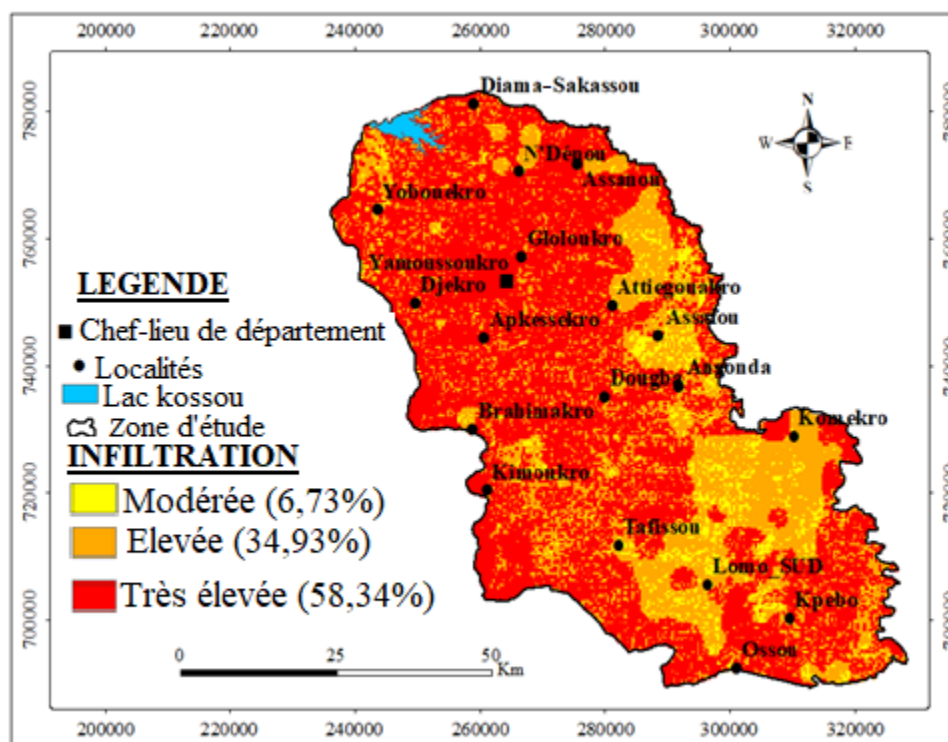
Le critère d'infiltration traduit la capacité d'une surface à résister ou à favoriser l'infiltration. Il est obtenu par la combinaison des cartes des critères pente et densité de drainage présentées à partir de la figure 18.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 18** : Cartes des paramètres infiltration : (a) pente, (b) densité de drainage

La Carte du critère infiltration proprement dite, est dominé par la classe d'infiltration très élevée (Figure 19) qui occupe 58,34% de la superficie. Elle se rencontre sur la quasi-totalité de la zone d'étude avec des zones d'infiltration élevée et modérée occupant respectivement 34,93% et 6,73% du domaine d'étude.



**Figure 19** : Carte thématique du critère infiltration.

## RESULTATS ET DISCUSSION

La carte du facteur infiltration des eaux souterraines du département de Yamoussoukro a une marge d'erreur de 2,71%. Les paramètres densité de drainage et pente ont des valeurs d'incertitudes respectives de  $\pm 0,1$  et  $\pm 0,06$  (Tableau XIII).

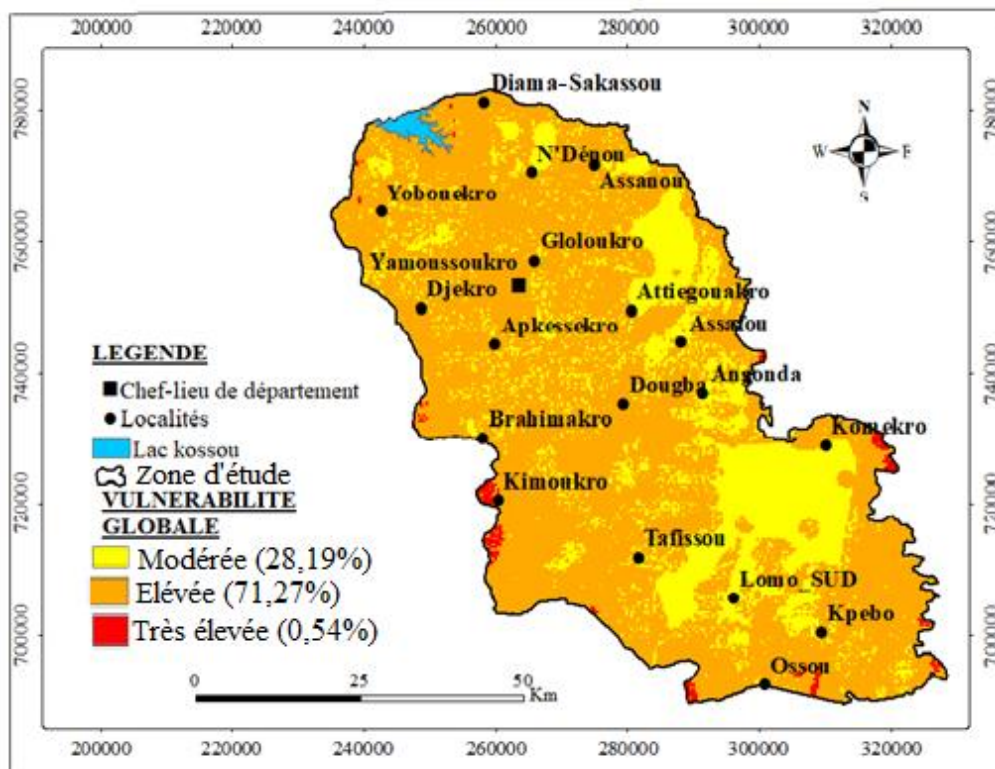
**Tableau XIII** : Statistique des paramètres de l'infiltration

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude
Pente	1	4	3,68	0,52	$\pm 0,06$
DD	1	4	2,22	0,79	$\pm 0,1$
Somme	$I_{v-m} = 5,9$			$\sum \Delta \bar{x} = 0,16$	
Erreur	$Er = 2,71\%$				

### 3.1.2.2. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

La combinaison de l'ensemble des critères Protection, Réservoir et Infiltration a permis d'obtenir la carte de vulnérabilité globale des aquifères à la pollution à partir de la méthode PaPRI. La carte finale (Figure 14) a la particularité de faire ressortir les zones à protéger. L'analyse de cette carte montre que la classe à faible vulnérabilité n'existe pas sur la zone d'étude. En effet, les résultats montrent que la classe élevée domine le bassin à 71,27%. Les classes de vulnérabilité modérée et très élevée occupent respectivement 28,19%, et 0,54% de la superficie totale de la zone d'étude. Ces secteurs sont considérés comme des secteurs à surveiller vis-à-vis des activités anthropiques intenses qui ont tendance à polluer les eaux souterraines.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 20 :** Carte de la vulnérabilité globale à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro

L'erreur sur la carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du département de Yamoussoukro est de 1,31%. La superposition des cartes de Protection, de Réservoir et d'Infiltration dont les différentes incertitudes sont respectivement de  $\pm 0,04$  ;  $\pm 0,02$  et  $\pm 0,05$  a servi à l'élaboration de cette carte (tableau XIV).

**Tableau XIV :** Statistique des paramètres de vulnérabilité

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude
Protection	1,57	3,13	2,23	0,32	$\pm 0,04$
Réservoir	1	3,26	2,98	0,18	$\pm 0,02$
Infiltration	1	4	3,14	0,43	$\pm 0,05$
Somme	$I_{v-m} = 8,35$			$\sum \Delta \bar{x} = 0,11$	
Erreur	Er=1,31%				

### 3.2 Discussion

L'utilisation du SIG et de l'analyse multicritère sur le département de Yamoussoukro a abouti à la production des cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine. L'association de ces différentes cartes a permis de réaliser la carte des zones potentielles de stockages en eaux souterraines. L'analyse de cette carte de potentialité en eau

## RESULTATS ET DISCUSSION

souterraine montre que, la zone d'étude possède une bonne disponibilité en eau souterraine (77,31 % de la superficie totale). Cette bonne disponibilité en eau souterraine pourrait être due à une bonne densité de fracturation qui entrainerait une bonne infiltration des eaux dans l'aquifère (Shankar & Mohan, 2006 ; Doumouya *et al.*, 2012 ; Mangoua *et al.*, 2014). Cette bonne infiltration découle aussi de l'abondance des précipitations qui constituent la source première de l'alimentation des aquifères. En effet, dans les zones tropicales humides comme c'est le cas de la Côte d'Ivoire, les aquifères sont essentiellement alimentés par la pluviométrie via les infiltrations de surface (Savané *et al.*, 2001 ; Kouakou, 2011 ; Yao *et al.*, 2012). Les résultats de la classe de disponibilité mauvaise et moyenne pourraient être dû à des pentes très fortes associées à des densités de drainages fortes, qui accélèrent l'écoulement de l'eau et ralentissent ainsi l'infiltration dans la nappe (Shankar & Mohan, 2006). Ces zones ne favorisent pas la formation d'important réservoirs souterrains. Néanmoins, un forage implanté aux droits ou à l'intersection de méga-fracture ouvertes peut fournir des débits exceptionnels, bien qu'il soit en zone à disponibilité mauvaise ou moyenne. L'exploitabilité à son tour, est dominée par la classe bonne (57,83 %). Cette prédominance est favorisée par les formations essentiellement granitiques qui sont présentes sur plus de 90% de la superficie de la zone. En effet, selon N'Go *et al.* (2005) les granites hétérogènes constituent les formations lithologiques généralement très productives. Dans l'ensemble, la zone d'étude possède une bonne accessibilité en eau (61%) de la superficie de la zone. Ces classes bonnes et excellentes accessibilité seraient favorisées par la profondeur totale des forages qui pour la plupart sont moins profonds. Ces résultats obtenus sur la zone sont similaires à ceux obtenus par Saley (2003) ; Dibi (2008) ; Youan Ta (2008) ; Mangoua (2013) respectivement à Man, à Aboisso, à Bondoukou et sur le bassin versant de la Baya.

La méthode PaPRI, spécialement conçue pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque, est fondée sur des facteurs structurels et sur les comportements hydrauliques en accord avec les concepts de Mangin (1975) développés pour les karsts. Le facteur P qui caractérise la protection de la nappe regroupe tous les facteurs capables de jouer le rôle de premier rideau pouvant empêcher les polluants d'atteindre la nappe. La carte du critère protection de la zone d'étude reste dominée par la classe de vulnérabilité modérée qui couvre 57,75% de la zone d'étude. En effet, ces couches à épaisseurs et natures modérées qui proviennent de la combinaison des couches de sol, d'altérites et de la Zone non saturée pourraient s'opposer au transport des polluants. Elles pourraient aussi diminuer la vitesse d'infiltration et donc empêcher ces polluants d'atteindre la nappe souterraine. L'analyse de la carte du critère "réservoir" de la zone est dominée par la perméabilité modérée qui couvre plus de 59,97 % de la superficie. Cette

## RESULTATS ET DISCUSSION

perméabilité s'expliquerait par une densité de fracturation modérée puisque la roche réservoir est issue de l'altération de la roche saine (majoritairement granitique et quelque gneiss). Ces résultats sont en conformité avec ceux de Dibi *et al.* (2015) et Kamenan *et al.* (2020) qui indiquent qu'au niveau des formations du socle, le critère R est fortement dépendant de la fracturation et de l'altération qui affecte les propriétés hydrodynamiques du réservoir. Le critère "infiltration", de son côté, détermine la capacité à retarder ou à accélérer l'infiltration. Il est dominé par la classe d'infiltration très élevée et élevée sur la totalité de la zone d'étude. Ces classes occupent 93,27% de la zone d'étude. Dans ces zones, la densité de drainage est moyenne avec des pentes faibles. Cependant, la pente reste le paramètre le plus important car, plus la pente est faible, plus l'aquifère est vulnérable. Cela signifie que dans les zones de faibles pentes, l'eau reste en contact avec le sol plus longtemps et facilite son infiltration par rapport aux zones de fortes pentes. L'eau est alors rapidement évacuée comme l'ont indiqué les travaux de Prasad *et al.* (2008) qui ont montré que plus les pentes sont fortes et la densité de drainage est importante, plus la probabilité d'infiltration des eaux vers la nappe est faible et vice-versa. Enfin, la carte de vulnérabilité met en évidence la classe de vulnérabilité élevée qui occupe 71,27% de la superficie de la zone d'étude. Cette vulnérabilité élevée pourrait s'expliquer par la forte densité de fracturation qui confère aux formations géologiques souterraines une bonne perméabilité ainsi que des faibles pentes qui favoriseraient l'infiltration des eaux de la surface vers les nappes souterraines. A cela, ajoutons les épaisseurs moyennes des couches de protection qui facilitent plus ou moins le transport vertical du contaminant. Ces résultats sont similaires à ceux de Dibi *et al.* (2013), Mangoua *et al.* (2020) et de Kamenan *et al.* (2020) qui ont souligné l'importance du type de sol, indiquant que la présence d'un sol très perméable associée à une faible profondeur de la nappe et à une forte recharge serait une condition propice pour accroître la vulnérabilité à la pollution des aquifères. La méthode PaPRI a donné de bons résultats dans ce travail comme l'ont montré dans les travaux de Dibi *et al.* (2015) et Mangoua *et al.* (2018) mais comporte quelques difficultés dans la réalisation des cartes de vulnérabilité. Ces difficultés résident essentiellement dans le nombre de critères à prendre en compte et dans les limites des classes et des cotes qui leur sont assignées (Murat, 2000). En dépit de ces différentes limites, la carte de vulnérabilité demeure fiable. La fiabilité de cette carte a été testée par la détermination de la marge d'erreur sur la carte de vulnérabilité comme l'ont fait Dibi *et al.* (2013). Dans la présente étude, la faible valeur de la marge d'erreur sur chaque carte témoigne à la fois de la bonne qualité des notes attribuées aux différents paramètres et de l'adaptation de cette méthode à la zone d'étude. En effet, la marge d'erreur calculée pour apprécier la méthode a donné 1,31%. Cette marge d'erreur est plus faible que celles obtenues

## RESULTATS ET DISCUSSION

par Kamenan *et al.* (2020) à Daloa. Les marges d'erreur obtenues par ces auteurs sont de 2,8% par cette même méthode.



# **CONCLUSION**

## CONCLUSION

L'identification des zones potentielles de stockage en eau souterraine faite à partir du SIG et de la méthode d'analyse multicritère, a permis de conclure que le département de Yamoussoukro regorge d'importantes ressources d'eau souterraine. Les classes excellente et bonne occupent environ 67% de la superficie de la zone, preuve d'une bonne infiltration des eaux. Ainsi, cette bonne infiltration des eaux sur l'ensemble du département pourrait rendre témoignage d'une bonne disponibilité, accessibilité et exploitabilité des eaux souterraines. Quant à la cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de ce département, elle a été réalisée à partir de la méthode de vulnérabilité intrinsèque PaPRI. Cette carte a été obtenue par la combinaison des trois critères à savoir : les critères protection, réservoir et infiltration. La zone est dominée par la classe de vulnérabilité élevée qui occupe 71,27 % de la superficie totale de la zone d'étude avec une marge d'erreur de 1,31%, qui montre que la carte de vulnérabilité intrinsèque est fiable à la zone d'étude.

Pour une bonne protection en eaux au sein du département, il serait intéressant de :

- déterminer les périmètres de protection autour des forages, afin de préserver la qualité des eaux souterraines ;
- faire une étude de modélisation hydrogéologique de transfert des polluants sur tout le département, pour maîtriser le comportement des polluants issus des différentes activités anthropiques.

# **REFERENCES**

## REFERENCES

- 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, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 283 p.
- Bézèlgues S., Des Garets E., Mardhel V. & Dörfliger N. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 - Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité. Rapport BRGM-51783FR, 41 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, Hydrodynamique, Hydrochimie et Isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 479 p.
- CPCS (1967). Classification des sols, travaux de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA de GRIGNON (Savoie, France), 87 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 unique de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 164 p.
- Dibi B., Konan-W.A.B., Konan K.F., Yao S.C., Zilé K.A., Savané I. & Gnakri D. (2013). Characterization of the origin of pollutants in groundwater from biostatistical tests : the case of catchment ehania, south-eastern Côte d'Ivoire. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(12) : 1178-1185 p.
- Dibi B., Plagnes V., Konan-W.A.B., & Savané I. (2015). Définition d'une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des ouvrages de captages d'eaux souterraines en zone de *socle*. Cas de la zone test du bassin versant d'Ehania (Sud- Est de la Côte d'Ivoire). *20eme journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues*. « *Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles* », La Roche-sur-Yon (France), 8 p.

## REFERENCES

- 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
- Doumouya I., Brou D., Kouassi I.K., Bachir S., Jourda J.P., Savané I. & Biémi J. (2012). Modelling of favourable zone for the establishment of water points by geographical information system (GIS) multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). *Environmental Earth Sciences*, 67(6) : 1763-1780.
- Dörfliger N. & Plagnes V. (2009). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. ; BRGM RP-57527- FR, 105 p.
- INS (Institut National de la Statistique) (2015). Recensement Général de la population et de l'Habitat. Répertoire des localités : District autonome de Yamoussoukro, 20 p.
- Jourda J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430 p.
- Koné J., Yéo P.A. & Koné Y.N. (2018). L'eau est une préoccupation majeure en Côte d'Ivoire. Dépêche, Abidjan (Côte d'Ivoire), 8 p.
- Kamenan Y.M., Mangoua M.J., Dibi B., Eblin S.G., Kouassi K.L. & Kouassi K.A. (2020). Assessment of vulnerability to Groundwater Pollution in the Lobo Watershed at Nibéhibé (Central-West, Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, 12 : 657-671.
- Kouakou K.E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant de la Comoé (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Mali). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 186 p.
- Kouamé K.J. (2007). Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution, Thèse de Doctorat unique, université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 229 p.

## REFERENCES

- Kavouri K., Plagnes V., Tremoulet J., Dörfli N., Rejjiba F. & Marchet P. (2011). PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability-application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*, 19 : 339–353
- Kouassi F.W., Mangoua M.J., Kouassi K.A., Kouadio Z.A., Alle H.P. & Goula B.T.A. (2017). Caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères fissurés de la région d’Odienné, Nord-Ouest de la Côte d’Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 13(3) : 30 - 42.
- Lafrance P., Banton, O., Campbell P. & Villeneuve J.P. (1989). Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Une application du logiciel VULPEST dans la région de Portneuf (Québec, Canada). *Water Quality Research Journal*, 24(1) : 163-178.
- Langevin C., Pernel F. & Pointet T. (1991). Aide à la décision en matière de prospection hydrogéologique. L’analyse multicritère au service de l’évaluation du potentiel aquifère, en milieu fissuré (granite de Huelgoat, Finistère, France). *Revue scientifique et techniques, hydrogéologie*, 1 : 51-64.
- Leblond P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d’Ivoire. Région de Yamoussoukro. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I (Bordeaux, France), 150 p.
- Mangoua M.J., Dibi B., Koblan E.W., Douagui G.A., Kouassi K.A., Savané I. & Biémi J. (2014). Map of potential areas of groundwater by the multi-criteria analysis for the needs for water of the Baya's catchment basin (East of Côte d'Ivoire). *African Journal Agricultural Research*, 9(45) : 3319-3329.
- Mangoua M.J., Konan K.S., Kouamé K.I., Zougrou N.N., Kouassi K.L., Savané I. & Biémi J. (2018). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du département de Tiassalé (Sud de la Côte d’Ivoire). *Environmental and water sciences public health & territorial intelligence*, 2(2) : 46-54.
- Mangoua M.J. (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 Unique de Doctorat, Université d’Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d’Ivoire), 171 p.

## REFERENCES

- M'bonu M. (1991). Hydrogéologie, hydrochimie et Géochimie isotopique des aquifères de socle du Plateau de Jos et des plaines environnantes (Nigeria). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (Vaucluse, France), 171 p.
- Mahé G., Laraque A., Orange D. & Marieu B. (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of hydrology*, 245(1-4) : 104-117.
- Maréchal J.C., Robert W., Patrick L., Kambhampati S. & Frédéric T. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socles : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Géosciences*, 335(5) : 451- 460.
- Margat J. (1991). La vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions, conception - estimation cartographie. Institut Européen de l'eau, 9 p.
- Murat V. (2000). Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, INRS-Géosciences, Québec (Canada), 127 p.
- Murat V., Paradis D., Nastev M., Bourque E., Hamel A., Lefebvre R. & Martel R. (2003). Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du Sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Commission géologique du Canada, Recherche en cours 2003-D3, 14 p.
- N'go Y.A., Gone D.L., Savane I. & Goble M.M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydro-climatique et physique. *Afrique SCIENCE*, 1(1) : 127-144.
- N'guessan K.A., Kouassi A.M., Gnaboa R., Traoré K.S. & Houenou P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbaniser : cas de la ville de Yamoussoukro (Centre de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 17 : 135-154.
- OMS & UNICEF (2017). Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et évaluation des Objectifs de Développement Durable. Rapport du Joint Monitoring Program, New York (Etats-Unis), 116 p.

## REFERENCES

- PCR (2019). Plan Cadre de Réinstallation. Projet d'électrification rurale de 1088 localités en Côte d'Ivoire. LOT 4 : Sassandra-Marahoué, Yamoussoukro, lacs, Zanzan, Comoé et Lagune. Rapport final, Abidjan (Côte d'Ivoire), 199 p.
- Prasard R.K., Mondai N.C., Pallavi B., Nandakumar M.V. & SJNGH V.S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in bard rock through the application of GIS. *Environment of Geology*, 55: 467-475.
- PRICI (2016). Projet de Renaissance des Infrastructures de Côte d'Ivoire. Rapport final du cadre de gestion environnementale et sociale, Côte d'Ivoire, 203 p.
- Saaty T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of services Sciences*, 1(1) : 83-98.
- Shankar R.M.N & Mohan G. (2006). Assessment of the groundwater potential and quality in the Bhatsa and Kalu river basins of Thane district, western Deccan Volcanic Province of India. *Environmental Geology*, 49 : 990-998.
- Sinan M. & Razack M. (2008). An extension to the DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environmental Geology*, 57 : 349-363.
- Saley M.B. (2003). Système d'informations à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 209 p.
- Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire) : apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398 p.
- Savané I., Coulibaly K.M. & Gioan P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 12 (4) : 231-237.
- Sawadogo A.N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta : étude régionale du bassin versant de Ima Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble (Grenoble, France), 350 p.



## REFERENCES

- Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y. & Baudry D. (2002). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 5. Opération sectorielle - Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques - Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions, Rapport BRGM/RP-51178-FR, 75 p.
- Soro G. (2010). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiebissou. Thèse unique de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 250 p.
- Vrba J. & Zaporozec A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, 131 p.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kanc A. & Sambou S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 19 : 136-157.
- Youan Ta M., Lasm T., Jourda J.P., Saley B.M., Adja M.G., Kouame K. & Biémi J. (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique*, 21(1) : 43-71.

# **ANNEXES**

ANNEXES

**Annexe 1** : Classification et standardisation des critères

**Tableau I** : Classification et standardisation des critères de disponibilité (Youan Ta *et al.*, 2011 ; Yao *et al.*, 2016)

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
<b>Disponibilité en eau souterraine</b>	Infiltration (mm)	Très faible	< 25	1
		Faible	25 – 40	3
		Moyenne	40 – 70	5
		Forte	70 – 100	7
		Très forte	>100	9
	Densité de fracturation (km/km <sup>2</sup> )	Très faible	< 5	1
		Faible	5 – 10	3
		Moyenne	10 – 15	5
		Forte	15 – 20	7
		Très forte	> 20	9
	Pente (%)	Très faible	0 -1	9
		Faible	1 – 2	7
		Moyenne	2 – 3	5
		Forte	3 – 4	3
		Très forte	> 4	1
	Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	Très faible	< 5	9
		Faible	5 – 10	7
		Moyenne	10 – 15	5
		Forte	15 – 20	3
		Très forte	> 20	1
Epaisseur d'altération (m)	Très faible	< 10	1	
	Faible	10 – 20	3	
	Moyenne	20 – 30	5	
	Forte	30 – 40	7	
	Très forte	> 40	9	

ANNEXES

**Tableau II :** Classification et standardisation des critères d’accessibilité et d’exploitabilité (Youan Ta *et al.*, 2011 ; Yao *et al.*, 2016)

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
Exploitabilité en eau souterraine	Niveau Statique (m)	Très faible	< 5	10
		Faible	5 – 15	8
		Moyenne	15 – 25	6
		Forte	25 – 40	3
		Très forte	> 40	1
	Débit d’exploitation (m <sup>3</sup> /h)	Très faible	< 1	1
		Faible	1 – 3	3
		Moyenne	3 – 5	5
		Forte	5 – 8	8
		Très forte	> 8	9
Accessibilité en eau souterraine	Profondeur de forage (m)	Très faible	<25	9
		Faible	25 – 52	8
		Moyenne	52 – 70	7
		Forte	70 – 85	5
		Très forte	> 85	1
	Probabilité de succès (%)	Très faible	< 20	1
		Faible	20 – 40	3
		Moyenne	40 – 60	5
		Forte	60 – 80	8
		Très forte	> 80	10

**Annexe 2 :** Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères

**Tableau III :** Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères de l’indicateur de disponibilité

	Infiltration	DF	Pente	DD	EA	Vp	Wi
Infiltration	1	5	2	7	5	3,23	0,46
DF	1/5	1	1/3	2	5	0,92	0,13
Pente	1/2	3	1	5	5	2,06	0,29
DD	1/7	1/2	1/5	1	1	0,43	0,06
EA	1/5	1/5	1/5	1	1	0,38	0,05

**Tableau IV :** Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateurs d’accessibilité et d’exploitabilité (Youan Ta *et al.*, 2011)

	IS	PF	Vp	Wi
Indice de succès (IS)	1	1/3	0,58	0,25
Profondeur forage	3	1	1,7	0,75
	QE	NS	Vp	Wi
Débit d’exploitation	1	3	1,7	0,75
Niveau Statique	1/3	1	0,58	0,25

ANNEXES

**Tableau V :** Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des facteurs de la vulnérabilité

Facteur Protection (P)					
	ZNS	Altérites	Sol	Vecteur Propre	Coefficient de Pondération
ZNS	1	3	3	2,08	0,59
Altérites	1/3	1	2	0,87	0,25
Sol	1/3	1/2	1	0,55	0,16
Facteur Roche (R)					
	Densité de fracturation	Nature de la Roche	Vecteur Propre	Coefficient de Pondération	
Densité de fracturation	1	3	2	0,63	
Nature de la Roche	1/3	1	1,15	0,37	
Facteur Infiltration (I)					
	Pente	Densité de drainage	Vecteur Propre	Coefficient de Pondération	
Pente	1	3	2	0,63	
Densité de drainage	1/3	1	1,15	0,37	

## **RESUME**

Les ressources en eau souterraine, bien que considérée comme sûre parce qu'elles sont censées être exempt de pollution, sont menacées par diverses sources de pollutions ponctuelles et diffuses. L'objectif de cette étude est d'étudier la vulnérabilité à la pollution des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro. Les données hydro-climatologiques, hydrogéologiques et des images satellitaires ont permis de réaliser cette étude. Le SIG associé à la télédétection et l'AMC ont été utilisés pour déterminer la potentialité en eau souterraine et de cartographier la vulnérabilité à la pollution à partir de la méthode PaPRI. Les résultats obtenus montrent que le département de Yamoussoukro regorge d'importantes réserves en eau souterraine qui couvre 67% de la superficie. Les résultats obtenus à partir de la cartographie de la vulnérabilité à la pollution font ressortir trois (3) classes de vulnérabilité qui sont les classes modérées (28,19%), élevée (71,27%) et très élevée (0,54%). Cette prédominance de la classe élevée (71%) montre que les eaux souterraines du département de Yamoussoukro sont exposées à un risque élevé de pollution.

**Mots clés : Vulnérabilité, Pollution, Eaux souterraines, Aquifère de fissures, Yamoussoukro.**

## **ABSTRACT**

Groundwater resources, although considered safe because they are supposed to be free of pollution, are threatened by various sources of point and diffuse pollution. The objective of this study is to investigate the vulnerability to pollution of fractured aquifers in Yamoussoukro Department. Hydro-climatological and hydrogeological data and satellite images were used to carry out this study. GIS associated with remote sensing and MCA were used to determine the groundwater potentiality and to map the vulnerability to pollution using the PaPRI method. The results show that the department of Yamoussoukro has significant groundwater reserves covering 67% of the area. The results obtained from the mapping of vulnerability to pollution show three (3) classes of vulnerability which are moderate (28.19%), high (71.27%) and very high (0.54%). The predominance of the high class (71%) shows that the groundwater in Yamoussoukro department is exposed to a high risk of pollution.

**Key words: Vulnerability, Pollution, Groundwater, Fissure aquifer, Yamoussoukro.**