



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE**  
**UFR ENVIRONNEMENT**

**REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE**

**Union-Discipline-Travail**

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

**ANNEE ACADEMIQUE :**

**2019-2020**

**N° D'ORDRE : 0365/2021**

**N° CARTE D'ETUDIANT :**

**CI0416000654**

## **MASTER**

**GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

**THEME :**

**CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES  
EN EAU SOUTERRAINE EN MILIEU DE SOCLE :  
CAS DU DEPARTEMENT DE YAMOISSOUKRO  
(CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

**LABORATOIRE  
SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**Présenté par :**

**BOCOUM Boureima**

**JURY**

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

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

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

**Soutenu publiquement  
Le : 01 Mars 2021**

**Examineur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant  
Université Jean Lorougnon Guédé**



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE  
UFR ENVIRONNEMENT**

**REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE  
Union-Discipline-Travail**

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

**ANNEE ACADEMIQUE :  
2019-2020**

**N° D'ORDRE : 0365/2021**

**N° CARTE D'ETUDIANT :  
CI0416000654**

## **MASTER**

**GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

**THEME :**

**CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES  
EN EAU SOUTERRAINE EN MILIEU DE SOCLE :  
CAS DU DEPARTEMENT DE YAMOOUSSOUKRO  
(CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

**LABORATOIRE  
SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**Présenté par :**

**BOCOUM Boureima**

**JURY**

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

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

**Encadreur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,  
Université JEAN LOROUGNON GUEDE**

**Examineur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant  
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Soutenu publiquement  
Le : 01 Mars 2021**

## **DEDICACE**

À la mémoire de mon père BOCOUM Ousmane Boureima !

À mes Mamans chéries BOCOUM Khadija et COULIBALY Madjara !

À mes Frères et Sœurs !

À toute ma Grande Famille !

Sachez que vos efforts et souffrances pour moi n'ont pas été vains ! Que Dieu, lui-même, se souvienne de tout cela et vous maintienne le plus longtemps en vie afin que vous bénéficiiez des fruits de vos efforts.

## **REMERCIEMENTS**

Nous rendons grâce à Dieu, le tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la patience et le courage, afin d'en arriver là, où nous en sommes aujourd'hui !

Nous tenons également à apporter nos vifs remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, à travers un appui scientifique, un soutien moral, financier ou affectif, nous ont aidés à l'accomplissement de ce Mémoire de Master.

Nos remerciements vont en l'endroit du personnel de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa avec à sa tête Madame TIDOU Abiba Sanogo, Epouse KONE, Professeur Titulaire, Présidente de cette institution pour avoir accepté notre inscription en Master de Génie de l'Eau et de l'Environnement et pour l'effort consenti pour la formation de qualité dont nous avons bénéficiée.

Nous exprimons toute notre gratitude et reconnaissance au Directeur de l'UFR Environnement, Monsieur KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, pour le travail acharné qu'il accomplit à la tête de l'UFR. 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. Vous êtes une source d'inspiration pour nous, vous nous avez inculqué l'amour du travail et surtout du travail bien fait.

Notre reconnaissance et gratitude vont également à l'endroit de Monsieur DIBI Brou, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), de nous avoir fait confiance et d'avoir accepté de diriger ce mémoire. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour votre disponibilité, votre engagement tout au long de ce travail de recherche. Vous nous avez communiqué votre passion pour l'hydrogéologie, et fait profiter de votre expérience. Merci pour tout !

Nous adressons particulièrement nos remerciements à Monsieur 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. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Nous remercions également Monsieur ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant, examinateur de ce mémoire de master, d'avoir accepté de participer à l'amélioration de ce document.

Nous réitérons également notre gratitude et reconnaissance à tous les enseignants de l'UFR Environnement pour leur contribution à notre formation et pour la générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leur charge académique et professionnelles.

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 à M. KOUADIO Kouamé Jean Olivier, M. OUATTARA Gningnéri Souleymane, KOKOBOU Kouassi Hervé Jacques, M. KOFFI Bérenger, M. OUEDE Gla Blaise, M. TOURE Fanraban Fabrice, M. KONATE Yaya, Mlle KOUASSI Anne Marie, M. KONAN Yao Emile Desmond, M. COULIBALY Brice.

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

Nous remercions tous nos parents pour tout le soutien dont nous avons bénéficié durant cette quête du savoir, en particulier mon frère BOCOUM Amad, à mes sœurs BOCOUM Fatoumata et BOCOUM Kadi, à mon oncle BOCOUM Aboubacar, à tous mes frères et sœurs, et la famille BOCOUM et BARRY à Daloa plus particulièrement à Feu BOCOUM Boureima et Feu BARRY Aliou, de m'avoir accepté comme leur enfant et d'avoir été un soutien lors des moments difficile.

Les mots ne suffiront pas pour exprimer toute notre reconnaissance et gratitude. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Que tous ceux qui de loin comme de près nous ont aidé à la réalisation de ce mémoire et dont les noms n'y figurent pas, reçoivent ici l'expression de notre gratitude.

## TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTES DES FIGURES .....</b>	<b>vi</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : GENERALITES .....</b>	<b>3</b>
1.1 Situation géographique du département de Yamoussoukro .....	3
1.2 Caractéristiques physiques du département de Yamoussoukro.....	4
1.2.1 Régime Climatique.....	4
1.2.2 Relief .....	4
1.2.3 Végétation .....	4
1.2.4 Réseau hydrographique .....	5
1.2.5 Contexte géologique.....	5
1.2.6 Contexte hydrogéologique .....	7
1.2.7 Type de sol .....	8
1.3 Aspect socio-économique.....	8
1.3.1 Population.....	8
1.3.2 Activités économiques .....	8
1.3.3 Approvisionnement en eau potable dans le département de Yamoussoukro .....	8
1.4 Synthèse sur la cartographie des zones potentielles en eau souterraines en Côte d'Ivoire .....	9
1.5 Analyses multicritères .....	10
<b>DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES .....</b>	<b>11</b>
2.1 Matériel.....	11
2.1.1 Données .....	11

2.1.1.1	Données hydro-climatiques.....	11
2.1.1.2	Données cartographiques .....	11
2.1.1.3	Données des fiches techniques de forages et des essais de pompage .....	11
2.1.2	Outils de traitement de données .....	11
2.2	Méthodes .....	12
2.2.1	Bilan hydrologique .....	12
2.2.1.1	Estimation de l’ETP par la méthode Thornthwaite.....	12
2.2.1.2	Estimation de l’évapotranspiration réelle (ETR) .....	13
2.2.1.3	Estimation de la lame d’eau ruisselée R .....	13
2.2.1.4	Evaluation de la recharge .....	14
2.2.2	Elaboration de la carte de fracturation .....	14
2.2.2.1	Prétraitement des images Landsat Oli 8.....	14
2.2.2.2	Traitement numérique des images pour l’extraction des linéaments .....	15
2.2.2.3	Validation de la carte des linéaments.....	16
2.2.2.4	Analyse statistique de la fracturation .....	16
2.2.3	Cartographie des zones potentielles en eau .....	17
2.2.3.1	Identification et élaboration des critères de décisions .....	17
2.2.3.2	Classification et standardisation des critères de décision .....	19
2.2.3.3	Evaluation spatiale des critères de décision.....	21
2.2.3.3.1	Indicateur de disponibilité en eau souterraine .....	21
2.2.3.3.2	Indicateur d’accessibilité en eau souterraine .....	21
2.2.3.3.3	Indicateur d’exploitabilité en eau souterraine .....	22
2.2.3.4	La pondération des critères .....	22
2.2.3.5	Agrégation des critères.....	24
2.2.3.6	Etablissement de la carte des zones favorables à gros débits .....	25
2.2.3.7	Validations des différentes cartes thématiques .....	25

<b>TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>27</b>
3.1 Résultats.....	27
3.1.1 Bilan hydrologique.....	27
3.1.2 Cartographie des structures linéamentaires.....	27
3.1.2.1 Analyses statistiques des linéaments.....	28
3.1.2.2 Validation de la carte des linéaments.....	29
3.1.2.3 Distribution des intensités de fractures.....	31
3.1.3 Potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro.....	32
3.1.3.1 Disponibilité des ressources en eau souterraine du département.....	32
3.1.3.2 Accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro.....	33
3.1.3.3 Exploitableté des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro.....	35
3.1.3.4 Carte des sites potentiels en eau souterraine.....	37
3.2 Discussion.....	39
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>44</b>



## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>AHP</b>	: Analytical Hierarchy Process
<b>AMC</b>	: Analyse Multicritère
<b>CIEH</b>	: Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques
<b>CPCS</b>	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
<b>DHH</b>	: Direction de l'Hydraulique Humaine
<b>DRH</b>	: Direction Régionale de l'Hydraulique
<b>INS</b>	: Institut National de la Statistique
<b>LSTE</b>	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
<b>MNT</b>	: Modèle Numérique de Terrain
<b>OLI</b>	: Operational Land Imager
<b>OMS</b>	: Organisation Mondiale de la Santé
<b>ONEP</b>	: Office Nationale de l'eau potable
<b>PCR</b>	: Plan cadre de réinstallation
<b>PNUD</b>	: Programme des Nations Unies pour le Développement
<b>PRC</b>	: Projet Riz Centre
<b>PRICI</b>	: Projet de Renaissance des Infrastructures et de gestion urbaine en Côte d'Ivoire
<b>RGPH</b>	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
<b>SIG</b>	: Système d'Information Géographique
<b>SODEXAM</b>	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
<b>STRM</b>	: Shuttle Radar Topographic Mission
<b>UJLoG</b>	: Université Jean Lorougnon Guédé
<b>UNESCO</b>	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Classification et standardisation des critères de disponibilité .....	20
<b>Tableau II</b> : Classification et standardisation des critères d'accessibilité et d'exploitabilité .	21
<b>Tableau III</b> : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critères .....	23
<b>Tableau IV</b> : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur de disponibilité.	23
<b>Tableau V</b> : Matrice de comparaison par paire des critères des indicateur d'accessibilité et d'exploitabilité .....	23
<b>Tableau VI</b> : Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des critères des indicateur d'accessibilité et d'exploitabilité.....	24
<b>Tableau VII</b> : Bilan hydrologique du département de Yamoussoukro (1974-2019).....	27
<b>Tableau VIII</b> : Statistique des paramètres de disponibilité en eau souterraine.....	33
<b>Tableau IX</b> : Statistique des paramètres d'accessibilité en eau souterraine.....	35
<b>Tableau X</b> : Statistique des paramètres d'exploitabilité en eau souterraine.....	37
<b>Tableau XI</b> : Statistique des indicateurs de potentialité.....	39

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Présentation du département de Yamoussoukro .....	3
<b>Figure 2</b> : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1974-2019) .....	4
<b>Figure 3</b> : Réseau hydrographique du département de Yamoussoukro .....	5
<b>Figure 4</b> : Carte géologique du département de Yamoussoukro .....	6
<b>Figure 5</b> : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin.....	7
<b>Figure 6</b> : Carte détaillée des linéaments du département de Yamoussoukro .....	28
<b>Figure 7</b> : Rosace directionnelle des linéaments .....	29
<b>Figure 8</b> : Comparaison de rosace directionnelle .....	29
<b>Figure 9</b> : Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique et les linéaments	30
<b>Figure 10</b> : Carte de la densité de fracturation (5 km x 5 km) du département de Yamoussoukro.....	31
<b>Figure 11</b> : Carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	32
<b>Figure 12</b> : Diagramme de répartition des zones de disponibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	33
<b>Figure 13</b> : Carte d'accessibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	34
<b>Figure 14</b> : Diagramme de répartition des zones d'accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	35
<b>Figure 15</b> : Carte d'exploitabilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	36
<b>Figure 16</b> : Diagramme de répartition des zones d'exploitabilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	36
<b>Figure 17</b> : Carte des zones favorable à l'implantation des forages.....	38
<b>Figure 18</b> : Diagramme de répartition des zones potentiels en eau souterraine du département de Yamoussoukro .....	38

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'eau est une ressource essentielle, indispensable aux besoins fondamentaux de l'homme, de son environnement et représente un bien à caractère socio-économique incontestable. En 2010, le droit de l'Homme à l'eau potable et à l'assainissement a été explicitement reconnu par l'Assemblée générale des Nations Unies (Robert *et al.*, 2018). Dans le monde entier, la problématique de l'accès à l'eau potable demeure une préoccupation pour les autorités. En effet, 30% de la population mondiale n'ont pas accès à des services d'alimentation domestique en eau potable (OMS & UNICEF, 2017). Dans les pays en voie de développement l'accessibilité à l'eau potable constitue l'un des objectifs majeurs des projets de développements. En Côte d'Ivoire, de nombreux efforts ont été consentis depuis 1973 en vue de desservir les centres urbains, périurbains et ruraux en eau de qualité. Malheureusement des difficultés demeurent car l'eau potable n'est pas encore accessible à tous (Kouadio *et al.*, 2008). En effet, le problème d'approvisionnement en eau potable des populations est assez récurrent et clairement perceptible dans plusieurs régions (Joseph *et al.*, 2018).

De plus les eaux de surface ont une qualité physico-chimique et bactériologique douteuse et nécessitent des traitements souvent très onéreux. C'est pourquoi, l'approvisionnement en eau potable est orienté vers la recherche des eaux souterraines profondes dont la qualité répond généralement aux directives de l'OMS (Biémi, 1992). Malheureusement, l'accès aux eaux souterraines n'est pas encore totalement maîtrisé dans les milieux de socle où les aquifères présentent une certaine complexité. En effet, les ressources en eaux souterraines de socle sont mal connues (Biémi, 1992) et les conditions d'accès sont variables selon la nature des roches (roches cristallines d'origine plutonique et métamorphique) qui constituent le sous-sol (N'go *et al.*, 2005). Dans la région des Lacs, l'alimentation en eau potable des populations rurales est assurée en majorité par les eaux souterraines contenues dans les aquifères cristallin et cristallophyllien. Dans cette région, 65% des forages réalisés ont été un échec (Soro *et al.*, 2010). Ce pourcentage élevé d'échec est alarmant et suscite beaucoup d'intérêts, notamment sur le plan scientifique, mettant ainsi en cause le niveau de connaissance sur le fonctionnement des aquifères fissurés. De plus, avec la demande croissante en eau de la capitale politique (Yamoussoukro), le taux de satisfaction des besoins en eaux potables de cette région pourrait être impacté considérablement. La cartographie des zones favorables à l'implantation des forages à gros débit dans cette région s'avère alors nécessaire pour réduire ce taux d'échec et contribuer au renforcement de la capacité de production de l'eau potable. C'est dans ce contexte que la présente étude a été initiée. Elle a pour objectif d'améliorer les connaissances nécessaires à l'implantation des forages à gros débit en zone fissurée. De façon spécifique, il s'agira de :

- Evaluer la recharge du système aquifère du département de Yamoussoukro ;

## INTRODUCTION

- Elaborer la carte de fracturation du système aquifère du département de Yamoussoukro ;
- Elaborer la carte de potentialité en eau souterraine du système aquifère du département de Yamoussoukro.

Pour répondre à ces objectifs, ce mémoire est subdivisé en trois parties structurées comme suit :

- la première partie traite des généralités sur la zone d'étude, de l'état des connaissances sur l'analyse multicritère et de la synthèse sur la cartographie des zones potentielles en eau souterraines en Côte d'Ivoire ;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de l'étude ;
- la troisième partie analyse et interprète les principaux résultats obtenus, suivi de leur discussion.

Une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats suivis des perspectives et des références bibliographiques met fin au travail.

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

## GENERALITES

### 1.1 Situation géographique du département de Yamoussoukro

Le département de Yamoussoukro est situé au Centre de la Côte d'Ivoire, à environ 245 Km d'Abidjan, entre les longitudes 5°9' et 5°33' Ouest et les latitude 6°32' et 7°4' Nord (Figure 1), et couvre une superficie de 1 268 Km<sup>2</sup>. Le département de Yamoussoukro compte deux sous-préfectures dont la sous-préfecture de Yamoussoukro et celle de Kossou (INS, 2015). Il est limité au Nord par le département de Tiébissou, au Sud par les départements d'Oumé et de Toumodi, à l'Est par le département d'Attiéguakro, et à l'Ouest par les départements de Sinfra et de Bouaflé. 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.

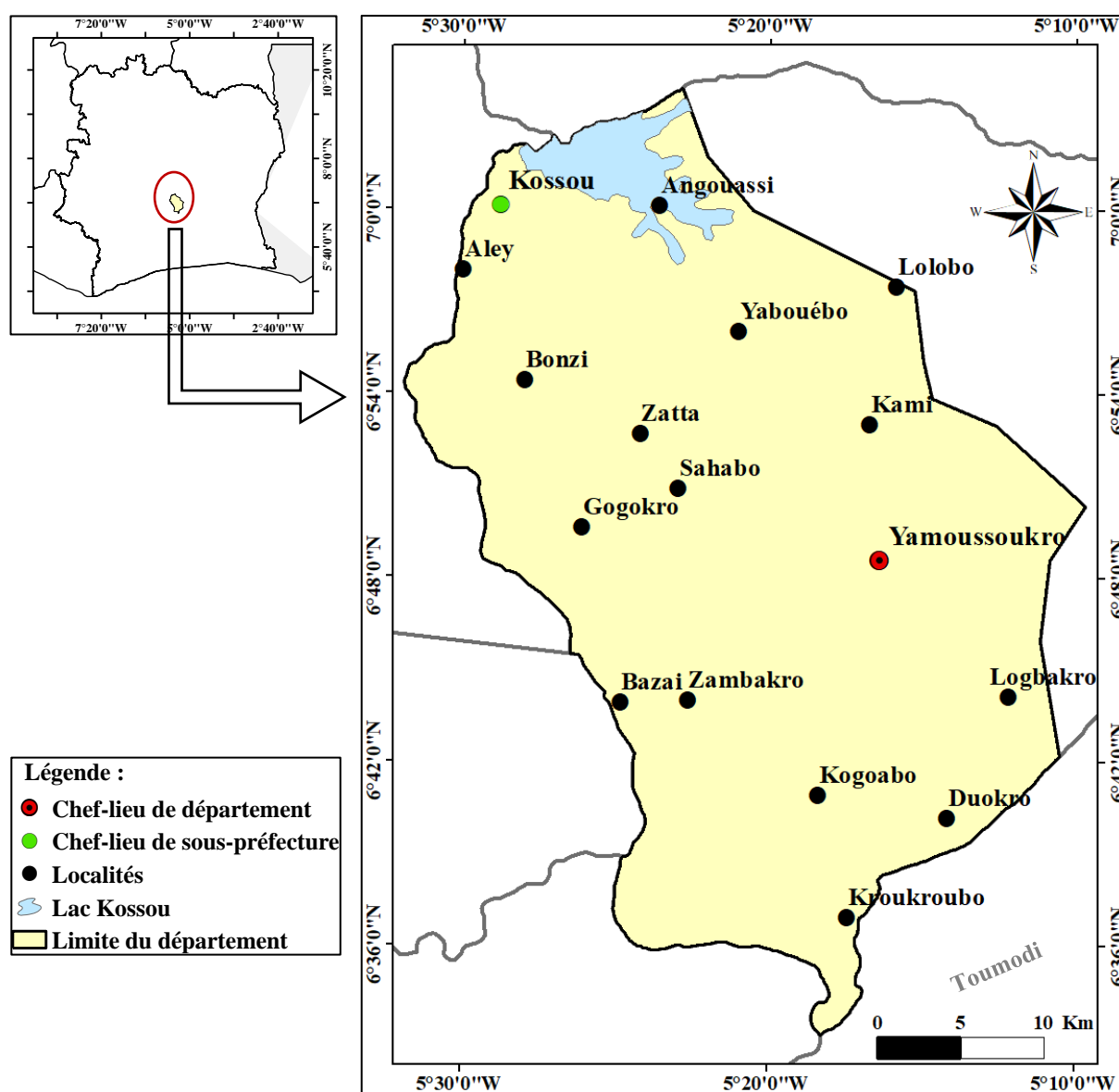


Figure 1 : Présentation du département de Yamoussoukro



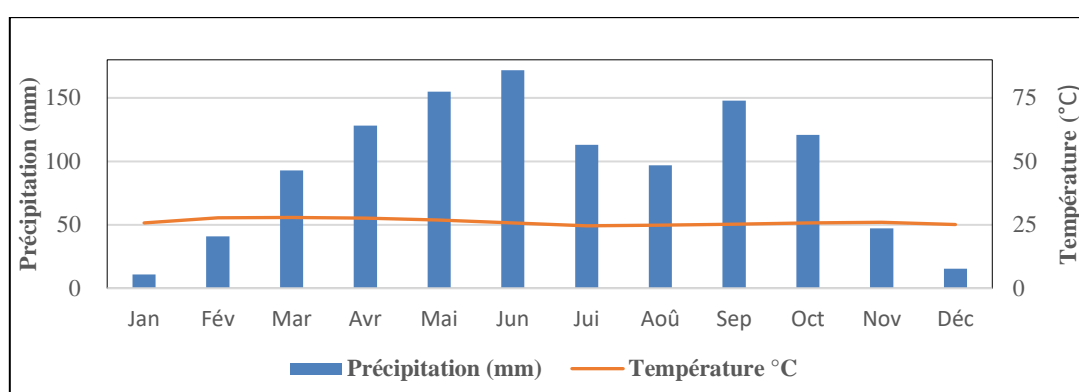
## 1.2 Caractéristiques physiques du département de Yamoussoukro

### 1.2.1 Régime Climatique

Le département de Yamoussoukro 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. La température 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).



**Figure 2** : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1974-2019)

### 1.2.2 Relief

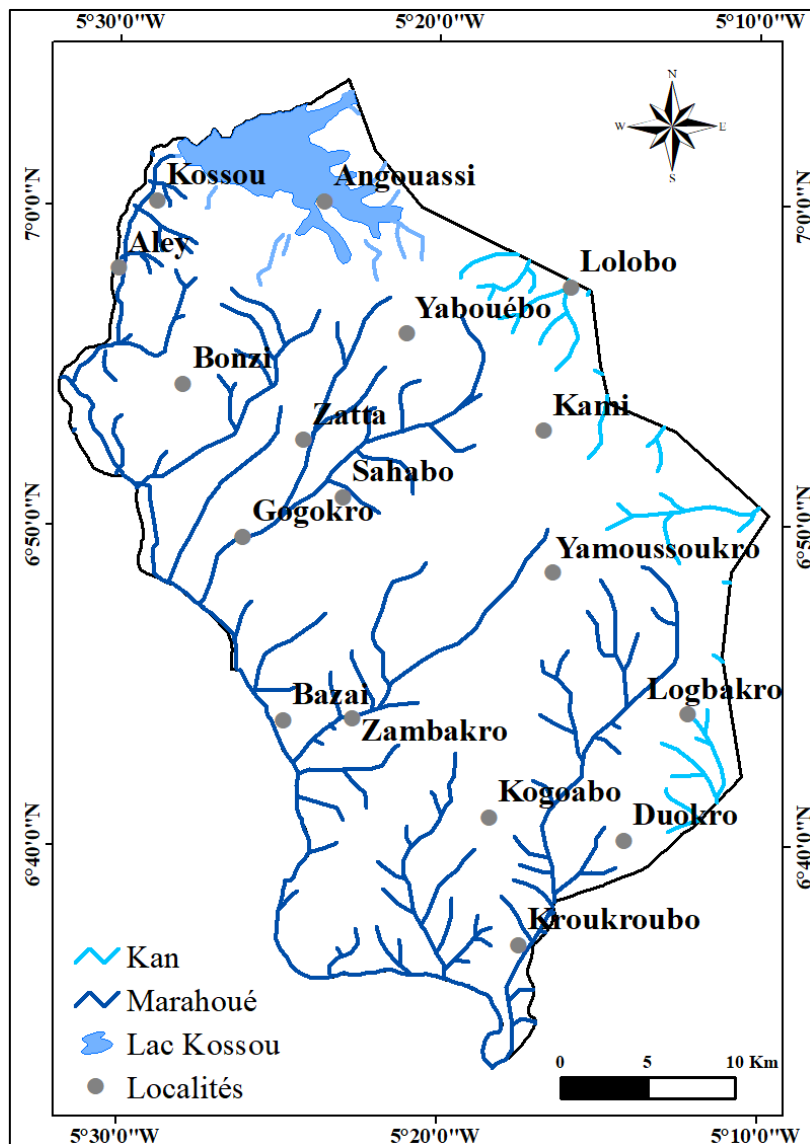
Le relief du département de Yamoussoukro est dans l'ensemble, un type de relief de plaines et de plateaux. On peut distinguer plusieurs niveaux de plateaux étagés, entre 200 et 500 mètres, séparés les uns des autres par un talus de faible hauteur (10 à 30 mètres) (PRICI, 2016). Quelques collines et chaînes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

### 1.2.3 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 du département de Yamoussoukro 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 (Stary, 1985 ; PRICI, 2016).

### 1.2.4 Réseau hydrographique

Le département de Yamoussoukro bénéficie d'un réseau hydrographique essentiellement composé de la Marahoué et du Kan (Figure3). La Marahoué constitue le principal affluent de la rive droite du Bandama, alors que le Kan est un affluent du N'zi, qui représente l'affluent de rive gauche le plus important du Bandama. Le Bandama est le seul fleuve à prendre pratiquement sa source en Côte d'Ivoire. Le département de Yamoussoukro compte une trentaine de lacs naturels et artificiels, dont le Lac naturel Kossou, sur lequel a été construit le barrage hydroélectrique de Kossou. On trouve également de nombreux barrages hydro-agricoles et quelques cours d'eau sur les affluents du Kan et de la Marahoué (PRICI, 2016).



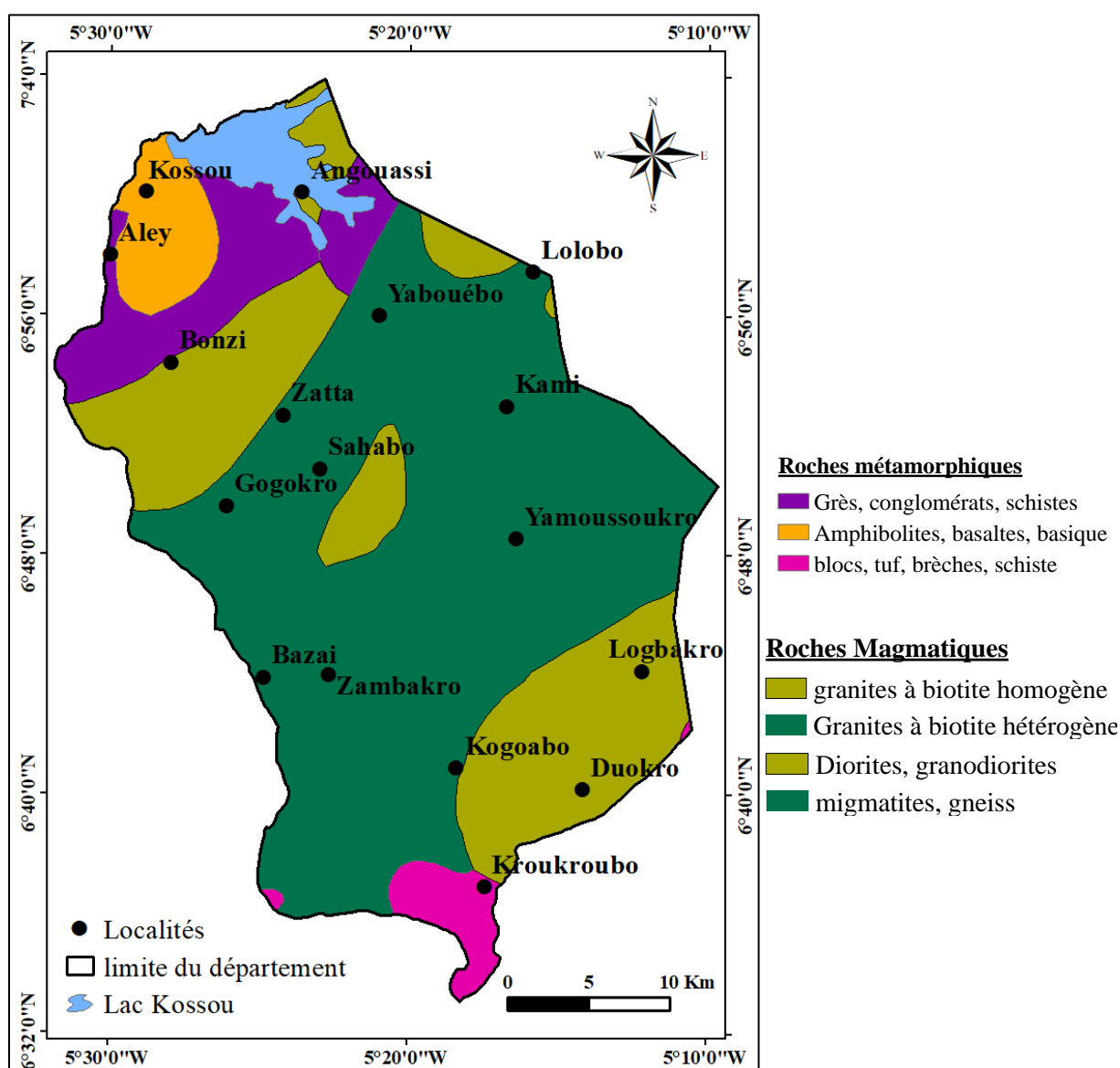
**Figure 3 :** Réseau hydrographique du département de Yamoussoukro

### 1.2.5 Contexte géologique

La Côte d'Ivoire est située au cœur de la dorsale de Man et est constituée de deux grands

## GENERALITES

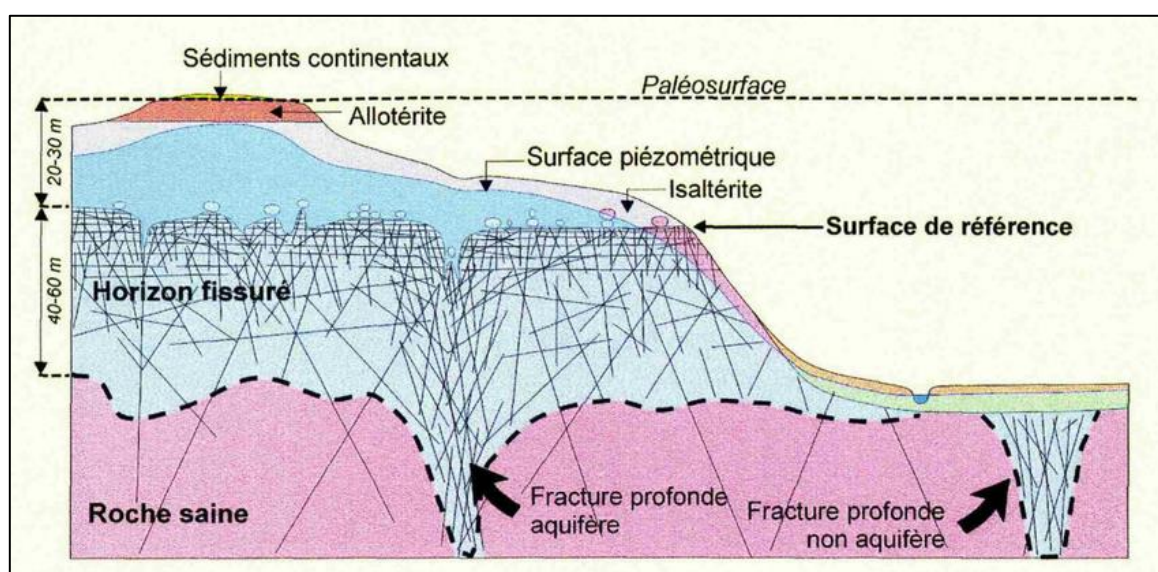
ensembles géologiques : le socle précambrien (97,5% du territoire) et le domaine sédimentaire (2,5% du territoire). Le département de Yamoussoukro appartient à la pénéplaine granito gneissique du socle précambrien. Les principales formations géologiques sont constituées de roches magmatiques et de roches métamorphique (Yacé, 1976 ; 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

### 1.2.6 Contexte hydrogéologique

Le département de Yamoussoukro comporte un aquifère composite, constitué d'altérite et d'une partie fissurée ou fracturée. Les altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Ce sont des formations de surface résultant des processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ces 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 ou puisards. 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 et de la plupart des divers types de pollution. 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)

### **1.2.7 Type de sol**

Les sols du département de Yamoussoukro 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).

### **1.3 Aspect socio-économique**

#### **1.3.1 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 population autochtones Akouè et Nanafouè, il faut adjoindre 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, la commune de Yamoussoukro connaît un fort taux de croissance démographique annuel de 2,26% de 1998 à 2014, (INS, 2015).

#### **1.3.2 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).

#### **1.3.3 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 marqué 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

## GENERALITES

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 construit 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. Ces travaux profiteront à plus de 3 000 ménages de la ville de Yamoussoukro et permettront de desservir de manière sécurisée, les localités situées sur les axes Yamoussoukro-Sinfra et Yamoussoukro-Tiébissou. Des forages ont également été réalisés dans les localités de Sakiaré Menou, N'debo, Lolobo, Konan-Koffikro, N'Denou. Cependant, des difficultés d'approvisionnement en eau potable sont toujours ressentis dans certaines localités du département de Yamoussoukro.

### **1.4 Synthèse sur la cartographie des zones potentielles en eau souterraines en Côte d'Ivoire**

L'objectif assigné à la recherche des réserves d'eau souterraine contenues dans les aquifères fissurés du socle précambrien ivoirien 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 du SIG associée à l'AMC a été appliquée avec succès dans plusieurs régions de la Côte d'Ivoire par divers auteurs. Mangoua (2013) a montré que 84% du bassin versant de la Baya est favorable à l'implantation des forages à gros débits. Avec une excellente potentialité estimée à 12% et 72% de bonne potentialité des ressources en eau souterraine. Dans le bassin versant de la Lobo, Yao (2015) a pu montrer que 99% du bassin versant est favorable à l'implantation des ouvrages à débit acceptables pour l'alimentation en eau souterraine, et dont 72% est favorable à l'implantation des forages à gros débit. Jourda (2005) a montré que 58% de la région de Korhogo est caractérisée par des zones de bonne et excellente potentialité en eau souterraine. Youan Ta *et al.* (2015) ont montré que plus de 58% du département de Oumé est favorable à l'implantation des forages à débit acceptable pour l'approvisionnement en eau potable. Ces zones sont caractérisées par 51% de la classe de bonne potentialité et 7,25% de la classe d'excellente potentialité en eau souterraine. Selon Pinatibi *et al.* (2015) tout le district du Denguélé est favorable à l'implantation des forages dont le débit est acceptable dans le cadre de l'hydraulique villageoise, avec 45% de la zone favorable à l'implantation des forages à gros débit. Mangoua *et al.* (2019) ont montré que le bassin versant du Bandama est caractérisé par 81% de zone favorable à l'implantation de forages dont les débits sont acceptables dans le cadre de l'hydraulique villageoise, avec 52% de la zone favorable à l'implantation de forage à gros débit.

## GENERALITES

Ces cartes thématiques sont utiles pour l'implantation des forages a gros débits et pour toute activité de développement et d'aménagement du territoire ivoirien. Ces différentes cartes constituent également une pré-prospection qui évite les phases de recherches lourdes, lentes et coûteuses comme l'ont indiqué les travaux de Langevin *et al.* (1991).

### 1.5 Analyses multicritères

L'analyse multicritère (AMC) 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). Les méthodes de l'AMC sont développées depuis les années 1960. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un bon choix. Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir. Pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix (Renault, 2003). En effet, une situation qui implique de nombreux critères peut être source de confusion en l'absence d'un processus de décision logique et bien structuré. Ainsi, l'objectif des méthodes d'analyses multicritères est d'aider à prendre une décision acceptable et réaliste, dans des situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite, et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de considérer tous les critères entrant en compte, leur attribuer un poids lié à leur importance relative, de noter chaque action par rapport à tous les critères, et finalement d'agréger ces résultats (Renault, 2003). L'AMC utilisée conjointement avec le SIG a déjà fait l'objet de plusieurs applications, surtout pour l'identification des zones favorables à l'implantation des points d'eau en Algérie (Jarar *et al.*, 2005), au Nigéria (Mogaji *et al.*, 2011) et en Côte d'Ivoire (Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2011 ; Doumouya *et al.*, 2012 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015 ; Mangoua *et al.*, 2019), etc.

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



### 2.1 Matériel

#### 2.1.1 Données

Pour mener à bien cette étude, le recours aux données hydro-climatiques, cartographiques, aux fiches techniques de forages et aux essais de pompage a été nécessaire.

##### 2.1.1.1 Données hydro-climatiques

Les données hydro-climatiques 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 de températures observées dans le département de Yamoussoukro sur la période de 1974 à 2019. Ces données ont permis de tracer le diagramme ombrothermique et d'estimer la recharge de l'aquifère du département de Yamoussoukro.

##### 2.1.1.2 Données cartographiques

###### ➤ Images satellitaires

Les images utilisées sont des images satellitaires 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 du réseau des linéaments.

###### ➤ Modèle Numérique de Terrain

Le Modèle numérique de terrain (MNT) utilisé à une résolution 30 m × 30 m. Il a été téléchargé à partir du site <https://earthexplorer.usgs.gov>. Ce modèle numérique de terrain a permis d'élaborer la carte des pentes, la carte du réseau hydrographique et de déterminer la densité de drainage.

##### 2.1.1.3 Données des fiches techniques de forages et des essais de pompage

Les données d'essai de pompage et des fiches techniques de forages utilisées proviennent de 20 forages repartis sur l'ensemble du département de Yamoussoukro. Ces données ont été fournies par l'antenne de la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) de Yamoussoukro.

#### 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 pour le traitement des données hydro-climatique et de forages ;
- le logiciel ArcGIS 10.4.1 pour tracer les linéaments et réaliser les différentes cartes ;
- le logiciel Linwin 2.1 pour l'analyse statistique des fractures ;
- le logiciel Envi 4.7 pour le traitement des images satellitaires.

## 2.2 Méthodes

### 2.2.1 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique permet de connaître les apports et les pertes en eau du bassin ou de la zone d'étude et donc de quantifier de façon globale les différents flux. En effet, le principe du bilan hydrologique qui découle de la notion de cycle de l'eau est fondé sur le fait que l'eau qui parvient à la surface de la terre s'écoule, s'évapore ou s'infiltré. Ainsi, il traduit de manière quantifiable le cycle de l'eau au niveau d'une région ou d'un bassin versant et exprime le partage des précipitations entre les différentes composantes du cycle de l'eau. L'équation générale du bilan hydrologique est donnée par l'équation (1) :

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

P : précipitation (mm)

R : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm)

$\Delta S$  : variation de stock des différents réservoirs du domaine.

A l'échelle du cycle hydrologique annuel, les variations de stock s'annulent sur un grand bassin versant (Mahé *et al.*, 1998). L'équation du bilan se simplifie alors aux seuls termes de l'évapotranspiration, du ruissellement, et de l'infiltration profonde qui peut constituer une source de recharge pour les eaux souterraines. Ainsi le bilan hydrologique s'exprime comme suit :

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

#### 2.2.1.1 Estimation de l'ETP par la méthode Thornthwaite

L'évapotranspiration potentielle désigne la quantité maximale d'évaporation vers laquelle tend le sol et le couvert végétal, lorsque le sol est abondamment pourvu en eau et que les plantes peuvent puiser par leurs racines l'eau nécessaire à la demande de l'environnement aérien (Mégnyen, 1979). L'estimation de l'ETP par la méthode de Thornthwaite (1954) donne de bon résultats (Mangoua, 2013 ; Yao, 2015) et est simple d'utilisation. Elle nécessite comme données d'utilisation la température et la pluviométrie moyenne mensuelle. La valeur mensuelle de l'ETP est calculée par la formule suivante (Equation 3) :

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

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

$\alpha$  : fonction complexe de l'indice I

## MATERIEL ET METHODES

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7910^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (\text{Eq. 4})$$

I : Indice thermique annuel égal à la somme des 12 indices mensuels i

$$I = \sum_1^{12} i \quad (\text{Eq. 5})$$

Chaque indice thermique mensuel est calculé selon la formule :

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

F ( $\lambda$ ) : facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et est donné par les tables de Gerbier.

### 2.2.1.2 Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

La détermination de l'ETR a été réalisée à partir de la méthode de Coutagne (Alassane, 2004 ; Houmed-Gaba, 2009 ; Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). Cette méthode est une méthode empirique qui a donné des résultats satisfaisants (Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). L'évapotranspiration réelle (ETR) est donnée par l'expression suivante :

$$\text{ETR} = P - \lambda P^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{(0,8 + 0,145 t)} \quad (\text{Eq. 8})$$

t : température moyenne annuelle en °C ; P : précipitation moyenne annuelle en m.

Cette méthode n'est applicable que si :  $1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$ , avec P en m.

### 2.2.1.3 Estimation de la lame d'eau ruisselée R

Le ruissellement (R) représente la part de la pluie qui alimente le réseau de surface. Il est très dépendant des facteurs physiques et morphologiques du bassin versant, notamment le relief, le contexte géologique, le couvert végétal, la forme, l'orientation et la densité du réseau hydrographique. L'estimation du ruissellement (R) est faite par la formule de Tixeront-Berkaloff qui utilise la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle calculée par la méthode de Thornthwaite (Alassane, 2004 ; Kouassi *et al.*, 2012 ; N'guessan *et al.*, 2014). La formule de Tixeront-Berkaloff pour l'évaluation du ruissellement (R) se présente comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3 \text{ETP}^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

R : ruissellement moyenne annuel (mm) ; P : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm) calculée par la méthode de Thornthwaite.

### 2.2.1.4 Evaluation de la recharge

L'estimation de la recharge des nappes vise à déterminer la lame d'eau susceptible d'alimenter les nappes d'eau souterraine. Cette lame d'eau constitue le facteur le plus important qui conditionne la disponibilité des ressources en eau souterraine. En l'absence de suivi piézométrique, la méthode du bilan hydrologique a été choisie. La lame d'eau infiltrée (I) est déduite à partir de l'équation du bilan hydrologique suivant :

$$I=P-(ETR+R) \quad (\text{Eq. 10})$$

### 2.2.2 Elaboration de la carte de fracturation

Plusieurs études hydrogéologiques ont été menées dans les contextes de socle à travers l'utilisation de la télédétection (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2008 ; Koita, 2010 ; N'go *et al.*, 2010 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015). Elles avaient pour objectifs majeurs la proposition de méthodologies de caractérisation des accidents tectoniques et la détermination de leur rôle dans les écoulements souterrains. Toutes ces études s'orientent vers l'identification et la caractérisation de linéaments sur les images satellitaires. Les linéaments sont des objets rectilignes identifiables sur les images satellitaires qui traduisent des phénomènes géologiques profonds tels que les fractures, les failles ou les contacts géologiques. L'identification des linéaments dans les images satellitaires est tributaire de la capacité qu'a le capteur à détecter les légères variations de la réflectance associées à ces phénomènes géologiques (Dubois, 1999).

Selon El Hadani (1997), l'étude des linéaments permet de répondre à deux objectifs :

- l'orientation des campagnes de reconnaissance en définissant des zones potentiellement favorables ;
- la sélection de sites ponctuels pour l'implantation de forages.

L'utilisation des images satellitaires peut dès lors constituer l'un des tout premiers moyens d'étude des aquifères avant la mise en œuvre des autres méthodes telles que la prospection géophysique ou les essais de pompages pour confirmer et/ou compléter éventuellement les résultats. La cartographie des linéaments va se faire en quatre étapes : le prétraitement, le traitement d'image, la validation et l'analyse statistique des linéaments.

#### 2.2.2.1 Prétraitement des images Landsat Oli 8

Les prétraitements appliqués sur une image satellitaire sont de nature radiométrique et géométrique. Ils permettent d'éliminer les bruits radiométriques dans les bandes et de corriger les distorsions géométriques, afin de les rendre parfaitement superposables aux cartes thématiques existantes (cartes topographiques, géologiques et photogéologiques) (Jourda,

2005). En raison du fait que, la prise de vue soit effectuée en saison sèche, ces images apparaissent sans bruit radiométrique majeur et ne nécessitent donc pas de prétraitements importants.

### **2.2.2.2 Traitement numérique des images pour l'extraction des linéaments**

Les compositions colorées et le filtrage spatial directionnel ont été appliqués pour le rehaussement des images.

#### **✓ Techniques de composition colorées**

Cette méthode se présente comme étant une technique d'amélioration de l'image en vue de permettre une bonne visualisation. Cette méthode est aussi appelée technique RGB (Red, Green, Blue) ou transformation RGB, et permet d'obtenir une image multichrome à partir de trois images monochromes. Les compositions colorées ont consisté à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu). Les compositions qui ont données les résultats les plus intéressants sont constituées des bandes Oli +2, Oli +3 et Oli +4. Ces compositions permettent la distinction des sols nus, des discontinuités lithologiques, des étendues d'eau et des linéaments régionaux et même très souvent locaux.

#### **✓ Techniques de filtrages spatiaux et extraction des linéaments**

Le filtrage spatial permet de mettre en évidence les frontières entre deux paysages et certaines particularités de l'image telles que les structures linéamentaires, routes, etc. Dans le cadre de cette étude les filtres directionnels de Sobel et le gradient de dimension (7x7) ont été utilisés. Ces techniques de traitement utilisés par plusieurs auteurs ont donné de très bons résultats (Biémi, 1992 ; Kouamé, 1999 ; Jourda, 2005 ; Mangoua, 2013 ; Yao, 2015).

L'ensemble de ces traitements sur les images Landsat Oli 8 a permis de fournir des supports visuels complémentaires sur lesquels le travail de photo-interprétation des linéaments s'est appuyé.

Le relevé des linéaments structuraux proprement dit a été réalisé par voie manuelle avec une analyse visuelle à l'écran. La méthode consiste à représenter par un segment de droite, les discontinuités-images et les changements brusques de tonalité observés sur les images traitées. Avant l'extraction des linéaments, le réseau routier et les fils électriques de haute tension sont vectorisés à partir de plusieurs cartes administratives calées dans le même système de coordonnées que les images satellitaires. Ensuite, ces différents éléments linéaires d'origine anthropique (routes, pistes, fils électriques et téléphoniques) sont superposés aux différentes images photo-interprétées de manière à éviter de les prendre en compte lors de l'extraction manuelle des linéaments.

### **2.2.2.3 Validation de la carte des linéaments**

La phase de validation des linéaments extraits à partir du traitement numérique d'images satellitaires est nécessaire pour préciser leur signification structurale (Razack, 1984).

Ainsi une fois la carte de linéaments réalisée, il faut la valider et donc montrer que les linéaments majeurs repérés sur l'image Landsat Oli 8 sont en accord avec la fracturation (relevée à l'affleurement et sur carte géologique) des formations géologiques du site d'étude. Cette validation est basée sur la comparaison des directions des grandes familles de linéaments (issus du traitement de l'image Landsat Oli 8) avec les directions de fracturation relevées sur la carte géologique et à l'affleurement (Koita, 2010). Aussi la superposition de la carte des linéaments à celle des forages implantés par la géophysique (Jourda, 2005) permet de mettre en évidence les coïncidences entre les grands traits tectoniques et les forages les plus productifs. En effet, selon Jourda (2005), les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et peuvent donc être un outil essentiel à la validation des linéaments. Dans le cadre de cette étude, la validation des linéaments a été effectuée à l'aide des travaux antérieurs réalisés dans la zone d'étude et des forages implantés par la géophysique sur la zone d'étude.

### **2.2.2.4 Analyse statistique de la fracturation**

Les linéaments réalisés à partir des images Oli de Landsat 8 ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle afin de faire ressortir les directions principales à travers la rosace directionnelle. En effet, l'orientation des fractures constitue l'un des paramètres essentiels intervenant dans l'écoulement des eaux souterraines en milieu de socle. Elle permet ainsi d'orienter vers les zones potentiellement favorables à l'implantation des forages. L'approche adoptée ici pour l'analyse statistique des linéaments est la discrétisation du champ de fracturation en mailles, en considérant la surface élémentaire représentative de la fracturation. Les dimensions de cette dernière pour laquelle la répartition directionnelle des fractures est cohérente dans le champ de fracturation réalisée est de 5 km × 5 km (maille régulière). En effet, lorsque la taille de la maille augmente, les données intégrées (nombres de fractures) sont très nombreuses et l'on observe une variation de la répartition directionnelle. Au-delà de 10 km, l'information directionnelle est estompée. Dans chaque maille, il est déterminé le nombre total de fractures et la longueur de chaque fracture. L'intérêt de la carte de fracturation est de mettre en évidence, la variabilité spatiale de l'intensité de la fracturation à petite échelle d'investigation. Pour ce faire, la carte de fracturation est géoréférencée afin d'être reconnue par le logiciel Linwin. Le programme du logiciel permet d'établir à la fois l'histogramme, la rosace directionnelle, la longueur cumulée et le nombre cumulé des fractures.

### 2.2.3 Cartographie des zones potentielles en eau

La cartographie des zones potentielles en eau souterraine nécessite la conception et la mise en place d'une base de données hydrogéologiques de la zone d'étude. L'approche méthodologie abordée pour l'élaboration de la carte de potentialité des ressources en eaux souterraines est basée sur l'utilisation des méthodes d'analyses multicritères (Savane, 1997 ; El Morjani, 2003 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2015, Mangoua, 2013 ; Yao, 2015 ; Mangoua *et al.*, 2019).

#### 2.2.3.1 Identification et élaboration des critères de décisions

Le premier élément fondamental de l'analyse multicritère est la création d'un ensemble d'attributs ou critères. Maystre *et al.* (1994) définissent le critère comme une expression qualitative ou quantitative de points de vue objectifs, aptitudes ou contraintes, relatives au contexte réel, permettant de juger des personnes, des objets ou des événements. Pour qu'une telle expression puisse devenir un facteur, elle doit être fiable et utile pour le problème considéré (Dibi, 2008). Selon Youan Ta *et al.* (2011), l'identification des critères est une phase décisive et délicate qui conditionne la qualité des informations générées en vue de la prise de décision. Ainsi, en référence aux travaux d'El Morjani (2003), Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Mangoua (2013) et Yao (2015), un certain nombre de critères est identifié, sélectionné et évalué pour atteindre l'objectif fixé. Dans le cadre de cette étude, les critères de décision utilisés ont été guidés par les résultats des travaux de Savané (1997), Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Mangoua (2013), Yao *et al.* (2016), Mangoua *et al.* (2019). Ces critères sont :

##### ➤ **La pente**

La pente (T) désigne l'inclinaison du terrain et conditionne l'accumulation des eaux. Elle permet d'identifier les zones à bonnes conditions de réalisation de forages où à bonnes conditions de recharge. Plus la pente est forte, plus le temps de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est court. La carte du critère pente en pourcentage (%) a été élaborée à partir des images SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de résolution 30 m x 30 m, grâce au logiciel ArcGIS ;

##### ➤ **Le niveau piézométrique**

Le niveau piézométrique (NP) permet de suivre la fluctuation du niveau d'eau dans l'aquifère. Il a été élaboré à partir des données des fiches techniques de 20 forages réalisés. Ces derniers varient entre 2,56 m et 45,7 m ;

##### ➤ **La densité de drainage**

La densité de drainage (DD) caractérise la pluie relative qui pourrait avoir infiltrée 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 des images SRTM sous le logiciel ArcGIS a permis d'établir la carte du réseau hydrographique. Cette carte permet à la suite d'un traitement sous le logiciel Linwin d'élaborer le critère densité de drainage (km/km<sup>2</sup>) grâce au logiciel ArcGIS. La zone d'étude est divisée en grille de 25 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 ;

### ➤ **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 nulle ou très faible augurent très défavorablement la présence de réservoir (Jourda, 2005). Le critère densité de fracturation (km/km<sup>2</sup>) a été élaboré à partir du traitement de la carte de fracturation sous le logiciel Linwin. La zone d'étude est divisée en grille de 25 Km<sup>2</sup>. La longueur totale de tous les linéaments dans chaque grille est calculée et utilisée pour déterminer la valeur de la densité de fracturation ;

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

Le débit (QE) de production délivré par l'ouvrage est élaboré à partir des données de 20 fiches techniques de forages et des essais de pompes. 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 30,7 m<sup>3</sup>/h ;

### ➤ **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 partir des données des fiches techniques de 20 forages. Ces données varient entre 2,4 m et 59,85 m ;

### ➤ **La probabilité de réussite ou indice de succès des ouvrages de captages**

L'indice de succès (IS) donne la probabilité de succès d'un forage et est calculé par la formule suivante (Equation 11) :

$$a = \frac{b}{10} \times 100 \quad (\text{Eq. 11})$$

Où  $a$  est l'indice de succès (%) ; et  $b$  est le débit d'exploitation (m<sup>3</sup>/h).



## MATERIEL ET METHODES

Selon les recommandations de l'Office Nationale de l'Eau Potable (ONEP), l'indice de succès permet la distinction des zones de bonne productivité caractérisée 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 ;

### ➤ **La profondeur totale du forage**

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 20 forages et varie entre 50,27 m et 95,89 m ;

### ➤ **L'infiltration**

L'infiltration efficace représente la frange d'eau qui va effectivement 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 exposée dans les paragraphes précédents (cf. paragraphe 2.2.1).

### **2.2.3.2 Classification et standardisation des critères de décision**

#### ➤ **Classification des critères de décision**

La classification consiste à regrouper les valeurs de chaque critère en un certain nombre de classes. Les différentes limites choisies pour ces classes ne sont pas nécessairement équidistantes mais fonction des objectifs fixés et du contexte général de l'étude (Jourda, 2005). Ces limites sont fixées en fonction des données disponibles et ne sont pas figées. Dans le cadre de cette étude, la classification tient compte de la variance des données et s'inspire de celle adoptée dans les travaux antérieurs de Jourda (2005), Youan Ta *et al.* (2011), Youan Ta *et al.* (2015), Yao *et al.* (2016), Mangoua (2013), Mangoua *et al.* (2019), Kouassi *et al.* (2019) réalisés en région de socle cristallin et cristallophyllien, et de celle proposée par le CIEH (Diluca & Muller, 1985) pour les débits. Ainsi, 5 classes ont été retenues en vue d'une meilleure interprétation des résultats. Il s'agit des classes très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

#### ➤ **Standardisation des critères de décision**

Une étape importante et incontournable est la standardisation des différents critères. En effet, ces critères sont exprimés dans différentes unités et pour une bonne analyse multicritère, une normalisation est nécessaire. Un intervalle commun de 1 à 10 est retenu pour cette opération. 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

## MATERIEL ET METHODES

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 ci-dessous (Tableau I et II).

**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>	Pente (%)	Très faible	0 - 1	9
		Faible	1 - 2	7
		Moyenne	2 - 3	5
		Forte	3 - 4	3
		Très forte	> 4	1
	Infiltration (mm)	Très faible	< 25	1
		Faible	25 – 40	3
		Moyenne	40 – 70	5
		Forte	70 – 100	7
		Très forte	>100	9
	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
	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
Epaisseur d'altération (m)	Très faible	< 10	1	
	Faible	10 - 20	3	
	Moyenne	20 - 30	5	
	Forte	30 - 40	7	
	Très forte	> 40	9	

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

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes
<b>Exploitableté en eau souterraine</b>	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
<b>Accessibilité en eau souterraine</b>	Probabilité de succès (%)	Très faible	< 20	1
		Faible	20 - 40	3
		Moyenne	40 - 60	5
		Forte	60 - 80	8
		Très forte	> 80	10
	Profondeur de forage (m)	Très faible	<25	9
		Faible	25 - 52	8
		Moyenne	52 - 70	7
		Forte	70 - 85	5
		Très forte	> 85	1

### 2.2.3.3 Evaluation spatiale des critères de décision

L’évaluation spatiale des critères est fonction de la thématique étudiée. Chaque thème appelé aussi indicateur est formé d’un ensemble de critères ou facteurs nécessaires à la réalisation de l’indicateur (Savané, 1997). Dans le cadre de cette étude, les indicateurs qualitatifs et quantitatifs étudiés sont au nombre de trois. Il s’agit des indicateurs de disponibilité, d’accessibilité et d’exploitabilité des ressources en eau souterraine.

#### 2.2.3.3.1 Indicateur de disponibilité en eau souterraine

L’indicateur de disponibilité traduit la notion de l’existence d’un aquifère et constitue la première condition à connaître avant tout 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. L’infiltration est le paramètre le plus important pour la disponibilité des eaux souterraines (Mangoua, 2013 ; Yao *et al.*, 2016).

#### 2.2.3.3.2 Indicateur d’accessibilité en eau souterraine

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 est le paramètre le plus important dans l'indicateur d'accessibilité car il indique la profondeur à forer pour obtenir le débit optimal. De ce fait, il donne des informations sur le coût du forage, celui-ci (coût) étant facturé en fonction du nombre de mètres forés. Certains auteurs ont défini le meilleur intervalle ou le maximum de profondeur que doit atteindre un forage pour obtenir une productivité satisfaisante en milieu cristallin (Banks & Frengstad, 1998 ; Jourda, 2005). La plupart des auteurs ont montré que, lorsque la profondeur des forages augmente, la fermeture des discontinuités par pression litho-statique diminue leur productivité (Neves & Morales, 2007).

### **2.2.3.3 Indicateur d'exploitabilité en eau souterraine**

L'indicateur d'exploitabilité dépend du débit d'exploitation et du niveau piézométrique 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). La ressource en eau n'est exploitable que si le débit d'exploitation est significatif (au moins 1 m<sup>3</sup>/h). Le niveau piézométrique 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).

### **2.2.3.4 La 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). Selon Youan Ta *et al.* (2011), la technique de pondération proposée par Saaty est une méthode simple dont l'ossature est consolidée par des calculs mathématiques qui génèrent des coefficients de pondération (Cp) 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 III) à chaque critère selon leur importance dans la réalisation de l'indicateur donné.

## MATERIEL ET METHODES

**Tableau III** : 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

L'ensemble des notes attribuées à l'issue de la comparaison par paire permet de générer la matrice de comparaison par paire des critères de chaque indicateur (Tableau V et VI). Elle est également appelée matrice de jugement parce qu'elle porte les jugements du spécialiste qui est chargé de comparer les critères deux à deux. Au-delà de deux critères, il est possible que des incohérences soient observées dans le jugement apporté. D'où la nécessité d'adopter une méthodologie pertinente qui permet non seulement de mettre en évidence l'incohérence mais également d'apporter une solution pour corriger cette incohérence (Youan Ta *et al.*, 2015).

**Tableau IV** : Matrice de comparaison par paire des critères de l'indicateur de disponibilité  
(Youan Ta *et al.*, 2011)

	Pente	Infiltration	DD	DF	EA
Pente	1	1/2	5	3	5
Infiltration	2	1	7	5	5
DD	1/5	1/7	1	1/2	1
DF	1/3	1/5	2	1	5
EA	1/5	1/5	1	1/5	1

**Tableau V** : Matrice de comparaison par paire des critères des indicateur d'accessibilité et d'exploitabilité (Youan Ta *et al.*, 2011)

	Probabilité de succès (IS)	Profondeur de forage (PF)
Probabilité de succès (IS)	1	1/3
Profondeur de forage (PF)	3	1
	Débit d'exploitation (QE)	Niveau statique (NS)
Débit d'exploitation (QE)	1	3
Niveau statique (NS)	1 / 3	1

## MATERIEL ET METHODES

En s'appuyant sur la matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle proposée par Saaty (2008), le vecteur propre et le coefficient de pondération de chaque critère sont alors calculés selon les équations 12 et 13. un exemple du calcul de vecteur propre et du coefficient de pondération est donné au Tableau VI.

$$Vp_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n g_i} \quad (\text{Eq. 12})$$

Avec :  $Vp_j$  le vecteur propre ;  $n$  le nombre de critère et  $g_i$  la note du critère  $i$  obtenu dans la matrice de comparaison par paire

Le coefficient de pondération ( $Cp$ ) de chaque critère est obtenu par le rapport de son vecteur propre et la somme de tous les vecteurs propres des autres critères entrant dans la réalisation d'un indicateur donné, à partir de l'équation suivante :

$$Cp_j = \frac{Vp_j}{\sum_{i=1}^n Vp_i} \quad (\text{Eq. 13})$$

$Cp_j$  est le coefficient de pondération du critère  $i$  ; et  $Vp_j$  est le vecteur propre du critère  $i$ .

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

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

### 2.2.3.5 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 14) :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (\text{Eq. 14})$$

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

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

### 2.2.3.6 Etablissement de la carte des zones favorables à gros débits

Suivant la même logique de l'analyse multicritère, les indicateurs disponibilité, accessibilité et exploitabilité considérés ici comme des critères de décision vont être combinés selon la technique d'agrégation par pondération. Cette démarche s'explique par le fait que la ressource en eau souterraine recherchée doit être suffisante, accessible et exploitable. Il est important avant de procéder à cette combinaison de s'assurer que les différents indicateurs reflètent la sensibilité du terrain, d'où la nécessité de leur validation.

### 2.2.3.7 Validations des différentes cartes thématiques

Les cartes thématiques réalisées ont été validés 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 :

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (\text{Eq. 15})$$

$\Delta\bar{X}$  : 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 :

$$K = \frac{|E - \bar{X}|}{\sigma} \quad (\text{Eq. 16})$$

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.

## MATERIEL ET METHODES

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 %.



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

## RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Résultats

#### 3.1.1 Bilan hydrologique

Le département de Yamoussoukro reçoit en moyenne 1 169,9 mm de pluie chaque année (Tableau VII). L'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle estimée par la méthode de Thornthwaite vaut 1 563,5 mm par an. Les pertes par évapotranspiration réel déterminées par la méthode de Coutagne représentent 871,5 mm par an, soit 74,5 % des précipitations annuelles. La lame d'eau ruisselée (R) à la surface est estimés à 218 mm par an, soit 18,63 % des précipitations moyennes annuelles. L'infiltration (I) totale qui contribue à la recharge des nappes est de l'ordre de 80,38 mm par an. Cette lame d'eau représente environ 6,87 % de la pluie annuelle.

**Tableau VII** : Bilan hydrologique du département de Yamoussoukro (1974-2019)

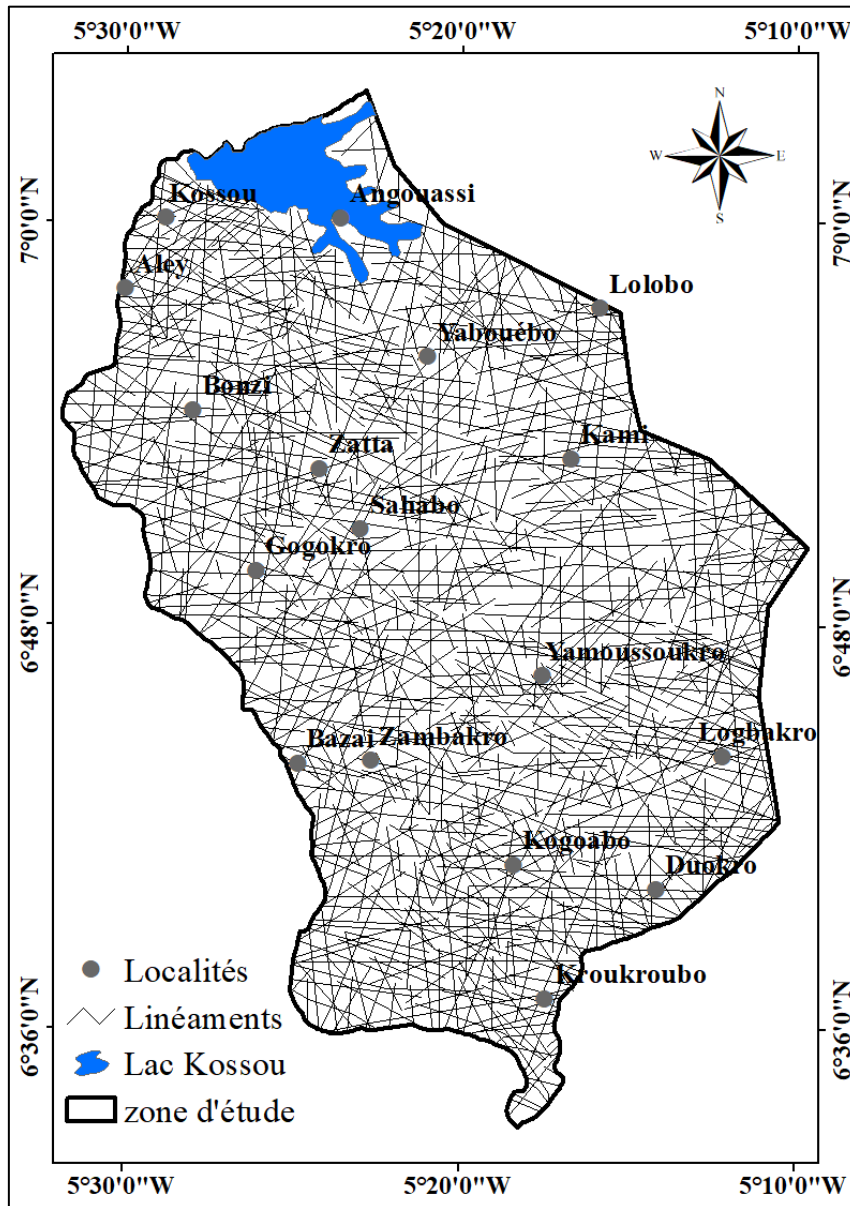
Mois	Pluies P (mm)	ETP (mm)
Janvier	24,7	123,8
Février	33,2	147,5
Mars	83,8	165,6
Avril	127,1	157,5
Mai	143,1	149,5
Juin	209,4	122,6
Juillet	140,1	108,8
Août	94,7	111,1
Septembre	121,2	115,1
Octobre	120,8	125,6
Novembre	56,5	123,6
Décembre	15,4	112,8
<b>Cumul annuel</b>	<b>1 169,9</b>	<b>1 563,5</b>
<b>ETR (mm/an)</b>		<b>871,5</b>
<b>R (mm/an)</b>		<b>218</b>
<b>Infiltration (mm/an)</b>		<b>80,38</b>

#### 3.1.2 Cartographie des structures linéamentaires

Le traitement des images réalisé à l'aide des techniques de combinaison d'images et l'application des filtres de Sobel ont permis de mettre en évidence de nombreuses discontinuités images. Ces images ont permis la vectorisation des fractures gouvernant certains affluents du fleuve Bandama, et le plus grand nombre de linéaments dans le département de Yamoussoukro. La carte détaillée des linéaments (Figure 6) comporte 922 linéaments extraits manuellement à partir de l'interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitement. La longueur cumulée des linéaments est égale à 1 640 km. L'exploitation de la carte du relevé détaillé des linéaments permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques à partir desquels

## RESULTATS ET DISCUSSION

est définie et caractérisée la géométrie des aquifères souterrains (densité de fracturation, distribution des longueurs et des orientations des linéaments). Cette carte du réseau des linéaments n'est pas exhaustive, mais elle est représentative de la zone étudiée.



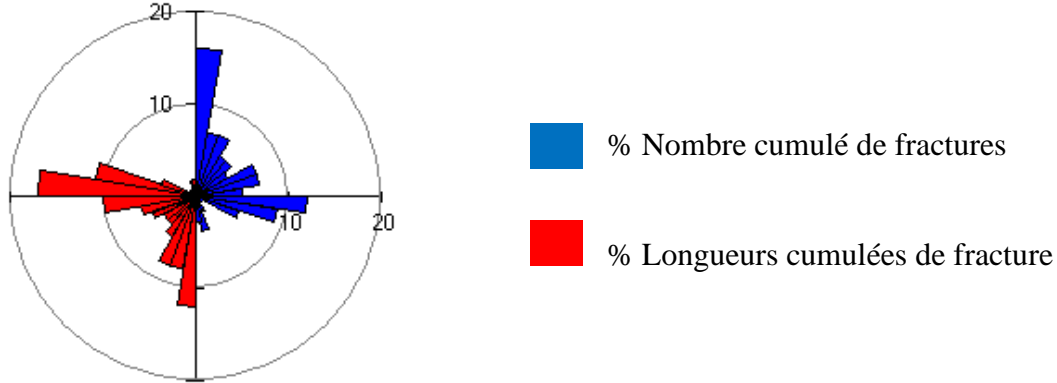
**Figure 6 :** Carte détaillée des linéaments du département de Yamoussoukro

### 3.1.2.1 Analyses statistiques des linéaments

L'analyse statistique des fractures a permis de déterminer les pourcentages en nombre de linéaments et en longueurs cumulées de linéaments. Elle a aussi conduit à la réalisation de la rosace directionnelle (Figure 7). La distribution de la fracturation exprimée en nombre et en longueur cumulée sur la rosace directionnelle est presque homogène. Les fractures sont regroupées selon leur orientation en 18 classes d'orientation par croissant angulaire de 10

## RESULTATS ET DISCUSSION

degrés. Les directions dominantes sont celles qui ont un pourcentage supérieur ou égal à 10%. Les directions obtenues (Figure 7) définissent trois orientations principales que sont les directions N 0-10° (N-S), N 90-100° (E-O), N 100-110° (NO-SE). Les directions les plus dominantes sont les directions N 0-10° (N-S) et N 90-100° (E-O).

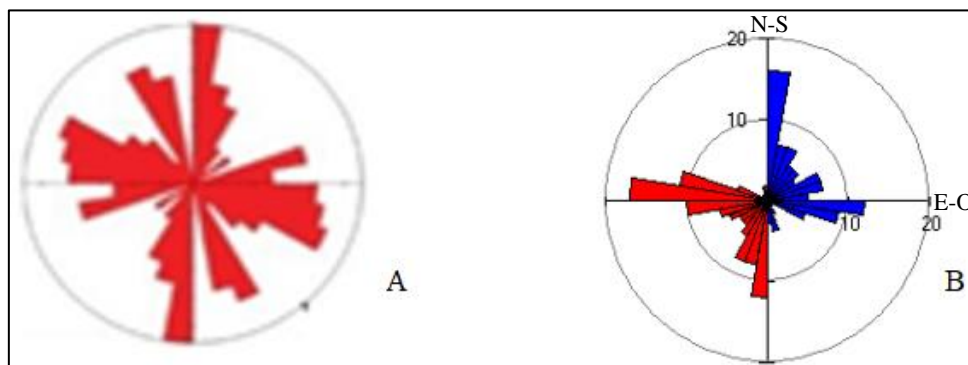


**Figure 7** : Rosace directionnelle des linéaments

### 3.1.2.2 Validation de la carte des linéaments

#### ➤ Validation par la comparaison de Rosaces directionnelles

La rosace directionnelle réalisée par Daï Bi *et al.* (2018) dans le sillon d'Oumé-Toumodi-Fetêkro (Centre de la Côte d'Ivoire) a donné trois directions principales, que sont les orientations N 0-10° (N-S), N 90-100° (E-O), N 100-110°, N 110-120° et N 150-160° (NO-SE) (Figure 8-A), avec une dominance des directions N 0-10° (N-S) et N 110-120° (NO-SE). Les directions principales obtenues à partir des images satellitaires sont : N 0-10°, N 90-100°, N 100-110° (Figure 8-B). Avec une dominance des directions N 0-10° (N-S) et N 90-100° (E-O).



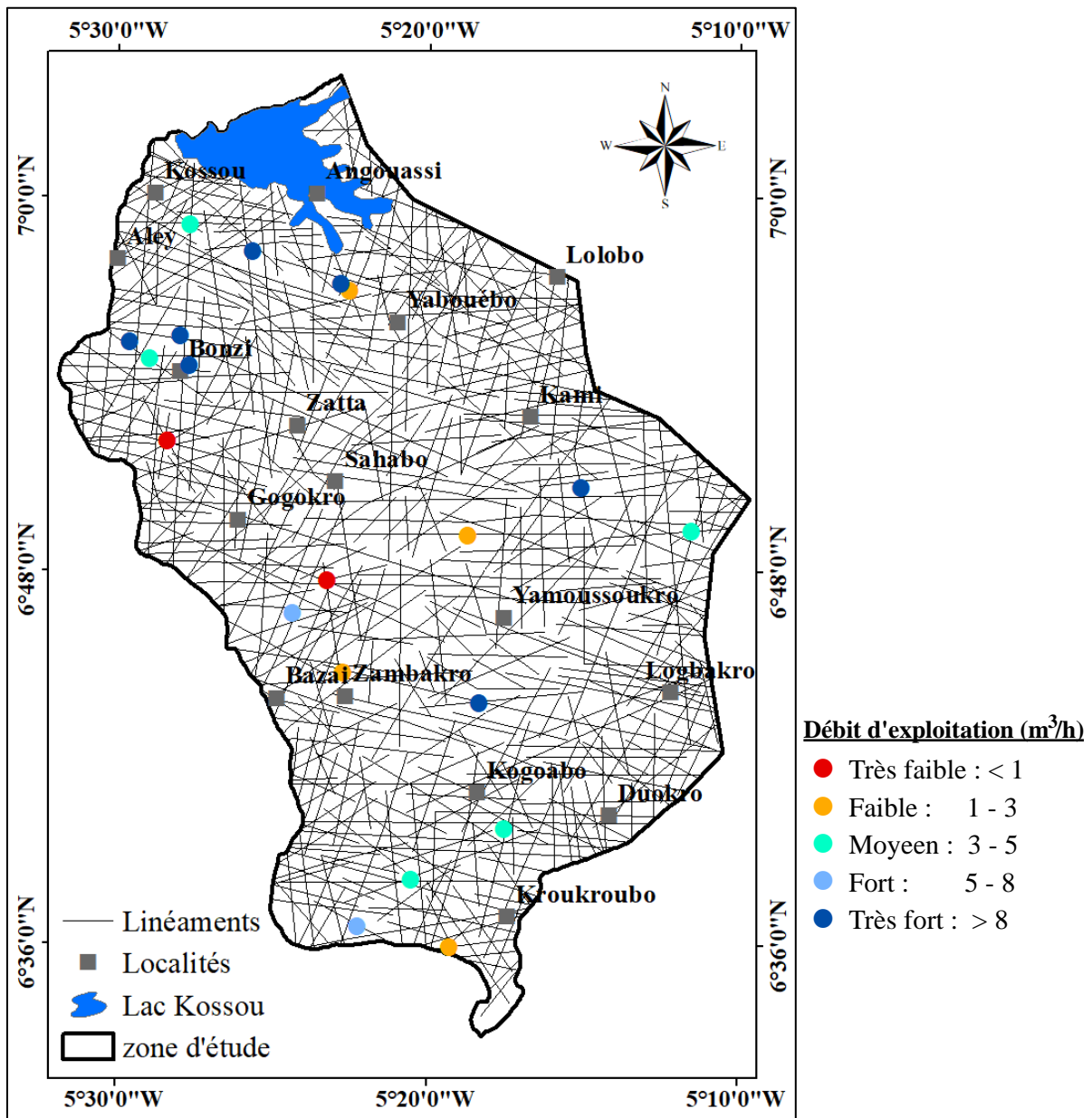
**Figure 8** : Comparaison de rosaces directionnelles

Les orientations des fractures obtenues par Daï Bi *et al.* (2018) dans la partie Centre de la Côte d'Ivoire sont presque concordantes avec celles obtenus à partir de la carte des linéaments. Cette concordance confirme donc la validation de la carte détaillée des linéaments du département de Yamoussoukro.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### ➤ Superposition des forages aux linéaments

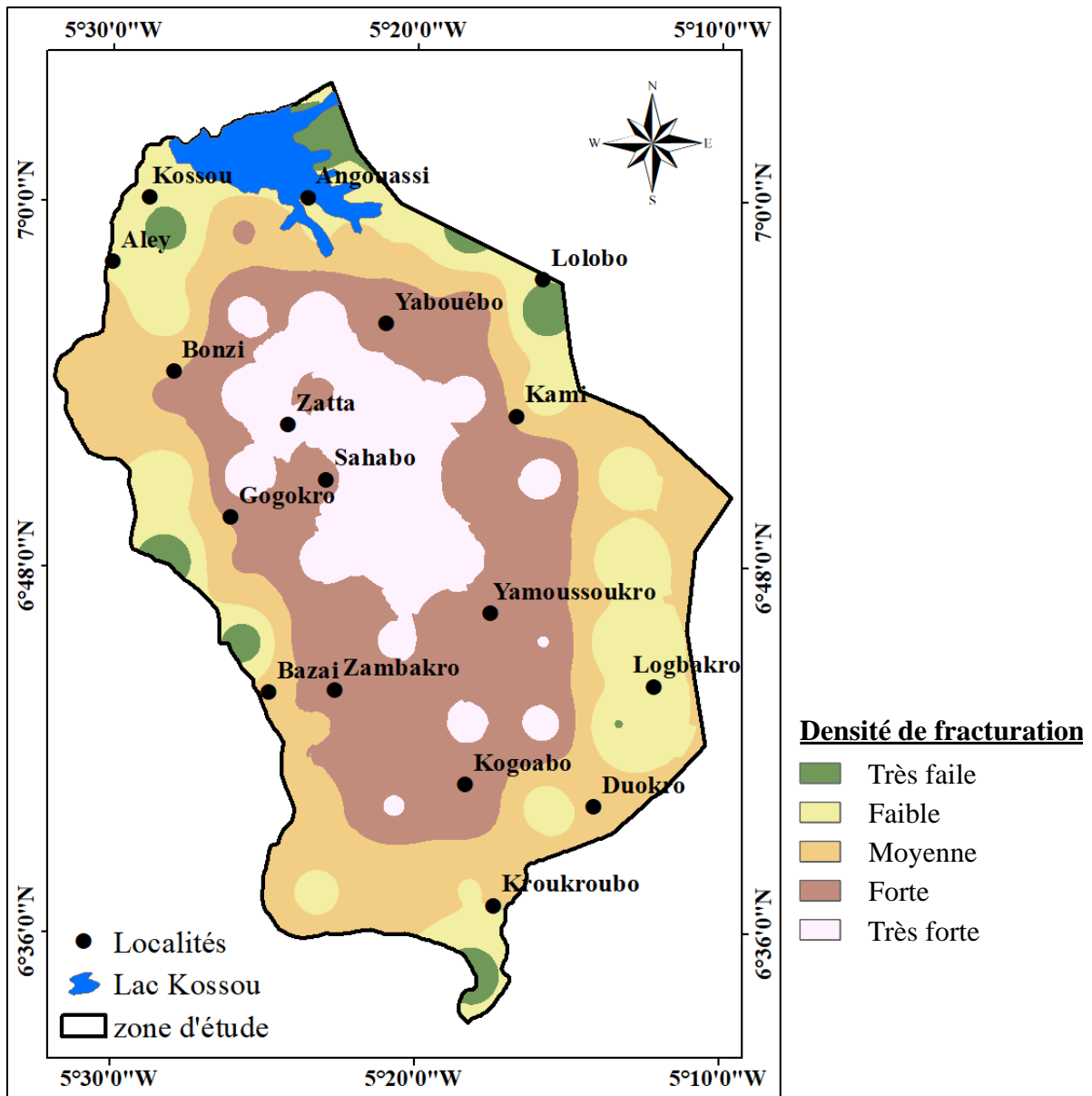
Les forages implantés avec la géophysique ont été superposés à la carte des linéaments issus des images Oli de Landsat 8 (Figure 9). En effet ces forages sont situés pour la plupart sur des linéaments ou à proximité de ceux-ci, même si parfois le débit de certains de ces forages est faible. On remarque que la majorité des forages situés à proximité ou sur les linéaments fournissent de gros débits. Ce résultat montre que les débits les plus importants obtenus dans cette région seraient liés aux fractures majeures. La validation de la carte des linéaments détaillés permet d'attribuer à l'ensemble des linéaments retenus, la valeur de fracture.



**Figure 9 :** Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique aux linéaments

**3.1.2.3 Distribution des intensités de fractures**

L'analyse globale de distribution de la densité de fracturation (Figure 10) montre une variabilité spatiale de l'intensité de fracturation, qui est repartit en 5 classes. Les classes très faible et faible occupent respectivement 4,6% et 20,4% de la superficie du département de Yamoussoukro. Ces classes sont reparties pour la majorité aux extrémités Nord, Sud, Est et Ouest du département. Les zones de classe moyenne et forte densité de fracturation occupent respectivement 28,5% et 31,3% du département. Ces zones sont présentes sur presque l'ensemble du département. Les zones à très forte densité de fracturation représentent 15,2% du département et sont réparties sur l'ensemble du département sous forme de poches. Dans l'ensemble la carte de densité de fracturation du département de Yamoussoukro montre que la zone est fortement fracturée.



**Figure 10** : Carte de la densité de fracturation (5 km x 5 km) du département de Yamoussoukro

### 3.1.3 Potentialités en eau souterraine du département de Yamoussoukro

#### 3.1.3.1 Disponibilité des ressources en eau souterraine du département

La carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro est caractérisée par quatre classes (Figure 11). L'analyse et l'interprétation de ces classes indiquent que :

- les zones à mauvaise disponibilité représentent 51,5% du département (Figure 12). Elles sont les plus représentées sur la zone d'étude et sont quasi-présentes sur l'ensemble du département ;
- la classe à médiocre disponibilité occupe 30,2% de zone la d'étude. Cette classe se présente sous forme de plage de différentes tailles, dont la majorité se trouve dans la partie Centre et Nord du département. On la retrouve également disséminée sur l'ensemble du département ;
- les zones à bonne et excellente disponibilité occupent respectivement 11% et 7,3% de la superficie du département. Ces zones se retrouvent disséminées sur l'ensemble du département.

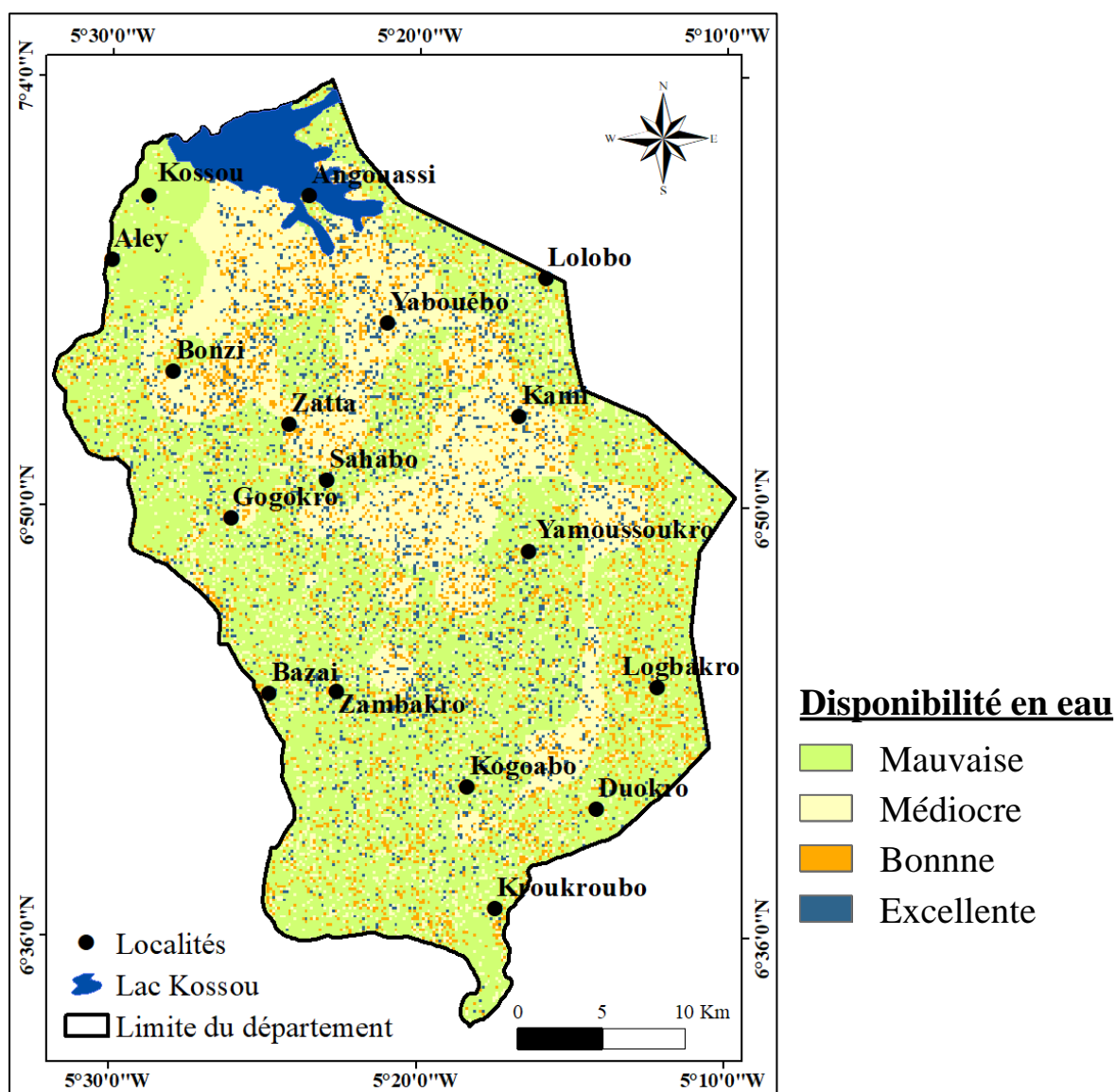
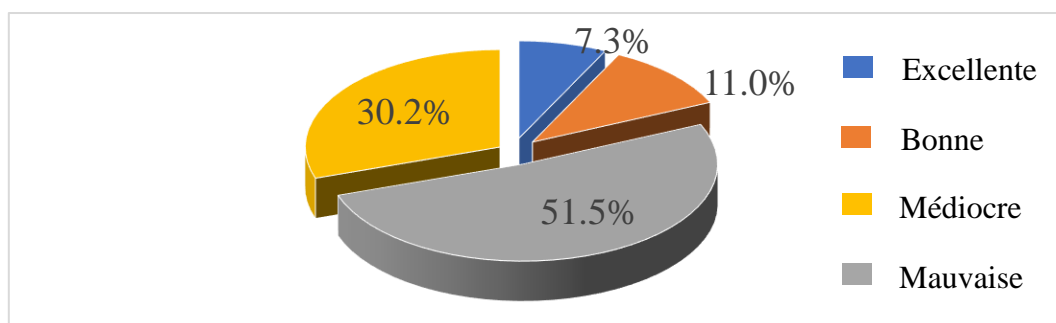


Figure 11 : Carte de disponibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 12** : Diagramme de répartition des zones de disponibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

Les incertitudes calculées sur les paramètres d'évaluation de la disponibilité en eau souterraine varient de  $\pm 0,002$  à  $\pm 1,9$  (Tableau VIII). On constate que dans l'ensemble, les erreurs commises dans l'élaboration de cette carte sont minimales à l'exception de celle de la densité de fracturation et de l'épaisseur d'altération. Outre les paramètres pente et épaisseur d'altération, le niveau de confiance obtenu est très significatif pour les critères retenus dans l'évaluation de l'indicateur disponibilité en eau. La carte de disponibilité des eaux souterraines à une marge d'erreur de  $\pm 0,003$  avec un niveau de confiance de 99%. Cela signifie que la carte de disponibilité en eau souterraine reflète les réalités du terrain.

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

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
Pente	0	176,1	7,1	6,7	$\pm 0,002$	1	68
DD	0,18	17,1	6,2	4,3	$\pm 0,6$	2	95
DF	0,18	45,9	20,2	13	$\pm 1,9$	2	95
EA	2,4	59,85	17,2	13,2	$\pm 1,9$	1	68
Disponibilité	5,3	9,5	6,8	0,7	$\pm 0,003$	3	99

DD : Densité de drainage ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) ; DF : Densité de fracturation ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) ;  
EA : Epaisseur d'altération (m) ; Pente T (%).

### 3.1.3.2 Accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

La carte d'accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro est caractérisée par quatre classes (Figure 13) :

- la classe à mauvaise accessibilité occupe 3,8% de la superficie du département (Figure 14). Cette classe se présente sous forme de poche, précisément, au niveau de Bonzi, entre la localité de Bazai et Sahabo, et dans une partie de l'extrême Ouest du département ;
- les zones à accessibilité médiocre représentent 21% du département et sont localisées dans les parties Nord-ouest, Ouest, Sud-ouest et les extrémités Est du département de Yamoussoukro ;



## RESULTATS ET DISCUSSION

- la classe à bonne accessibilité occupe 29,7% du département. Elle se localise en majorité dans la partie Nord et s'étend sous forme de bande longitudinale vers les zones Centre-ouest et Centre-est du département. Cette classe est également présente en faible proportion, au Sud de Sahabo, entre les localités de Logbakro et Duokro, et au Sud-ouest de Kogoabo ;
- la classe à excellente accessibilité des ressources en eau souterraine couvre la plus grande partie du département, avec 45,5%. Cette classe se localise essentiellement au sud et s'étend jusqu'au Centre et Centre-est de la zone d'étude.

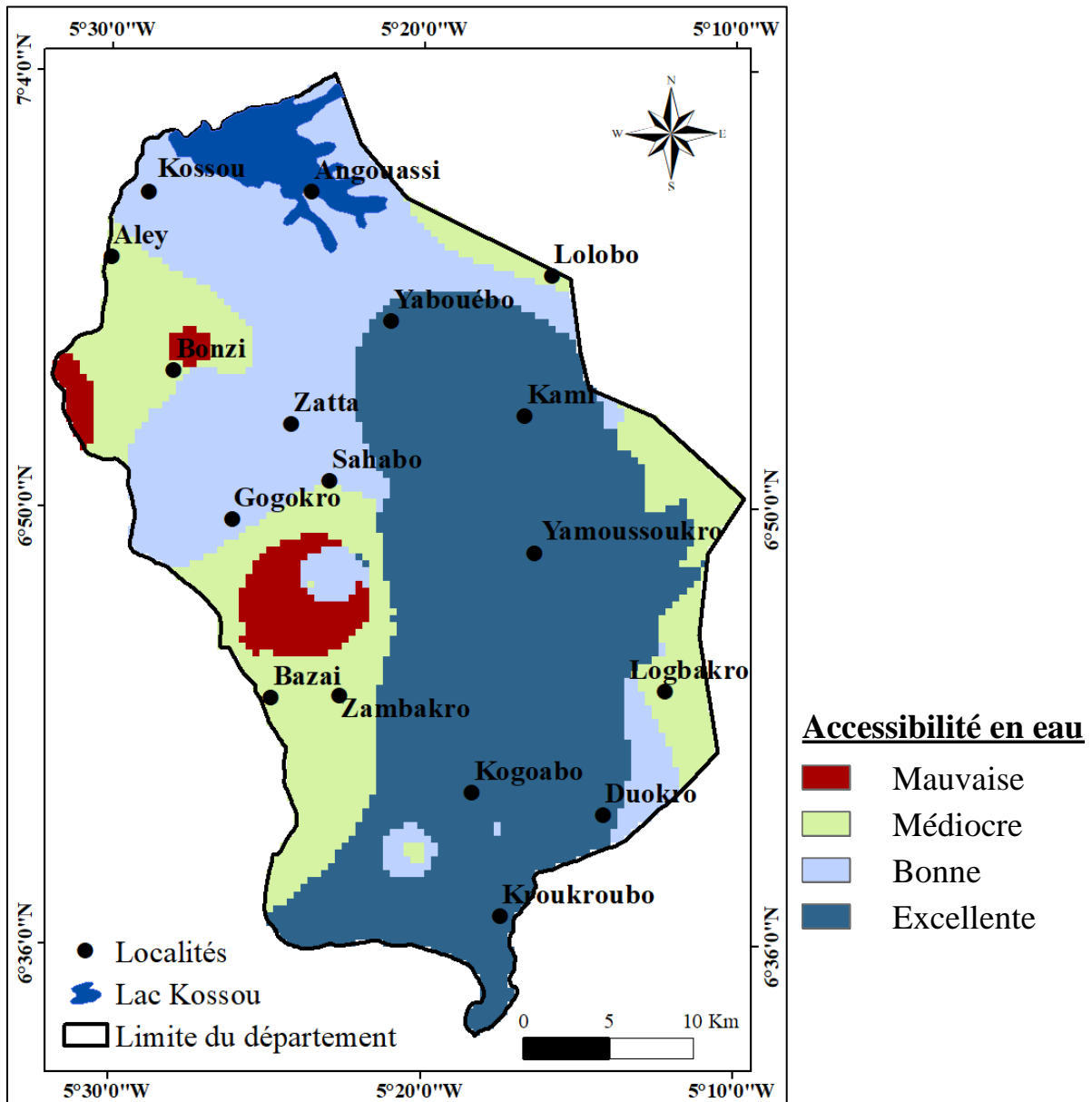
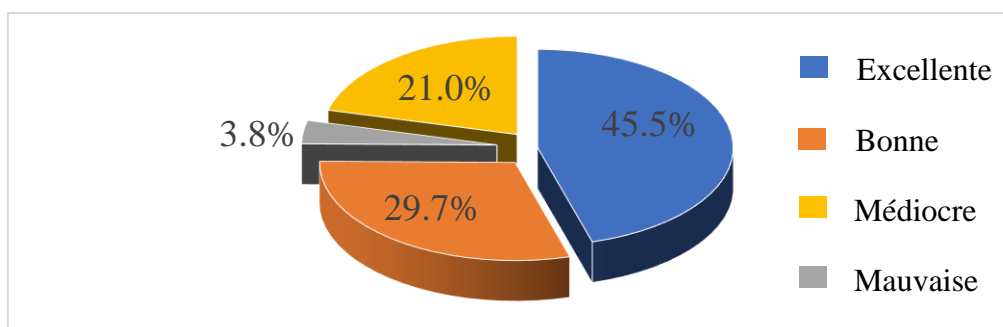


Figure 13 : Carte d'accessibilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 14** : Diagramme de répartition des zones d'accessibilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

Pour l'accessibilité en eau, les paramètres utilisés ont une incertitude de  $\pm 1,9$  pour la profondeur totale forée et  $\pm 10,5$  pour l'indice de succès avec respectivement un niveau de confiance de 95% et 68%. Ces paramètres présentent les valeurs d'incertitudes les plus grande (Tableau IX), cependant leur niveau de confiance dans l'ensemble est significatif. La carte d'accessibilité a une marge d'erreur de  $\pm 0,004$  avec un niveau de confiance de 99%. Ce qui signifie que la carte d'accessibilité en eau reflète les réalités du terrain.

**Tableau IX** : Statistique des paramètres d'accessibilité en eau souterraine

Paramètres	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
PF	50,27	95,89	72,9	12,8	$\pm 1,9$	2	95
IS	5,1	100	65,4	71,2	$\pm 10,5$	1	68
Accessibilité	1,5	8,5	5,1	1	$\pm 0,004$	3	99

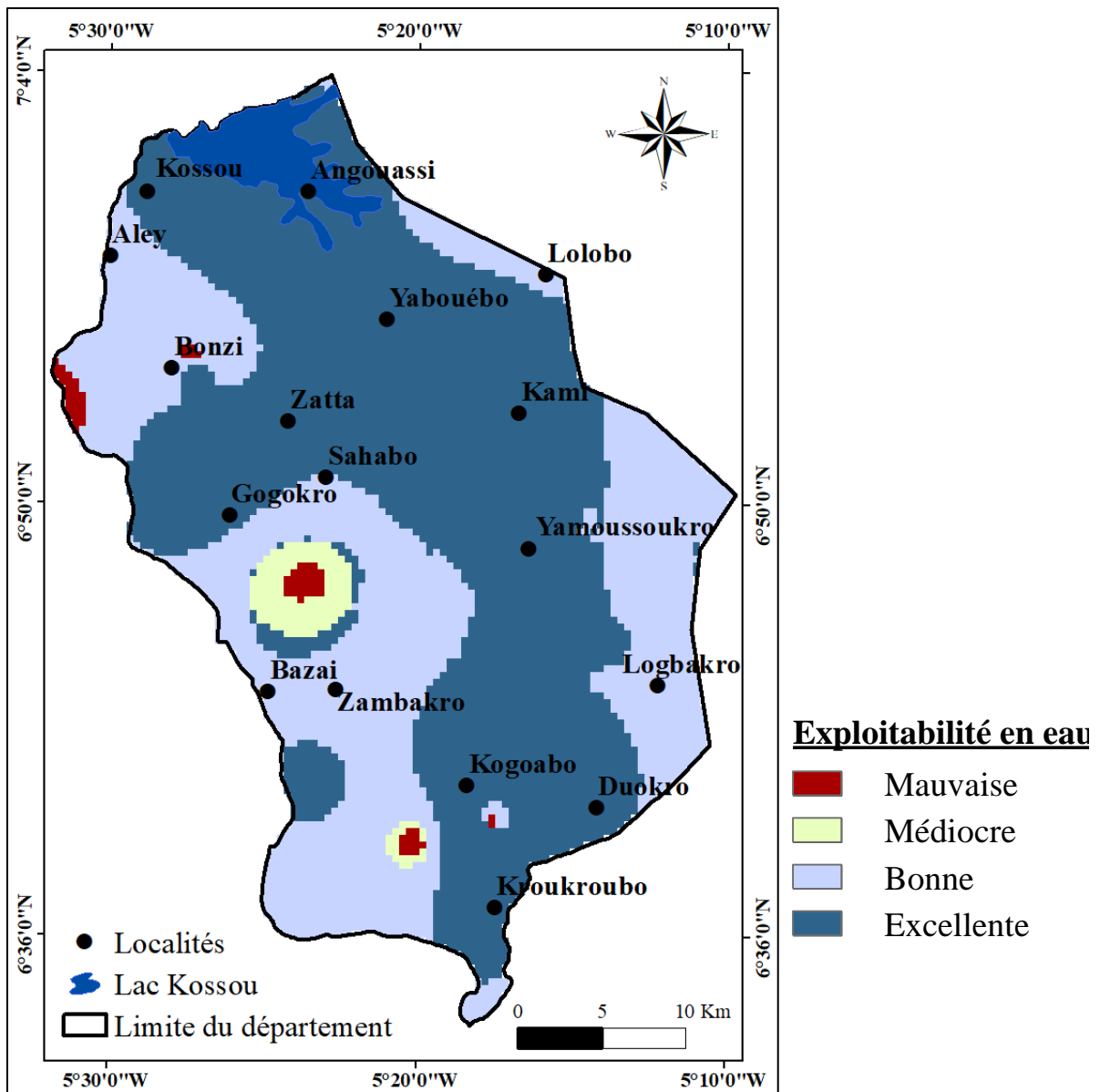
PF : profondeur totale de forage (m) ; IS : indice de succès (%)

### 3.1.3.3 Exploitable des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

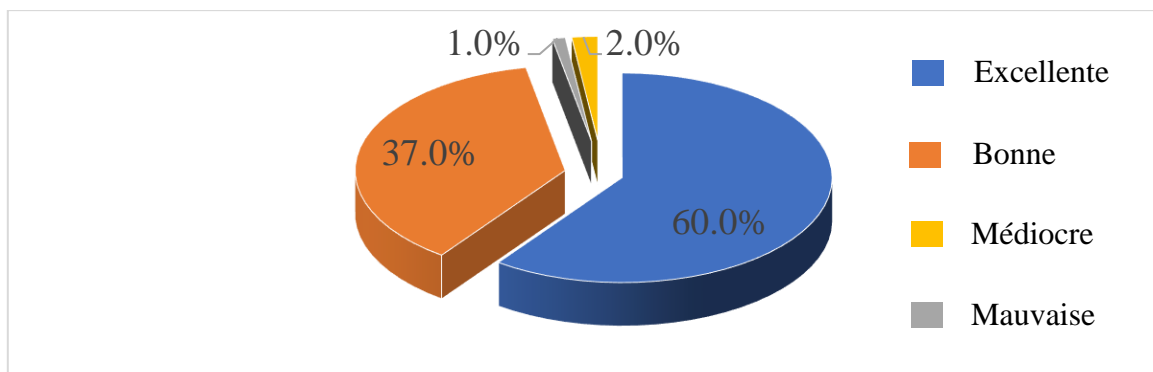
La carte d'exploitabilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro présente quatre classes d'exploitabilité (Figure 15) qui se répartissent comme suit :

- la classe mauvaise exploitabilité occupe 1% de la superficie du département, et celle de la médiocre exploitabilité représente 2% du département (Figure 16). Ces classes sont retrouvés sous forme de poche, au niveau de Bonzi, entre les localités de Bazai et Sahabo, au Sud de Kogoabo, et dans une partie de l'extrême Ouest du département ;
- la classe à bonne exploitabilité occupe 37% de la zone d'étude et apparaît essentiellement dans les secteurs Sud-ouest, Ouest, Nord-ouest et Est du département ;
- la classe à exploitabilité excellente est la plus représentative du département avec une proportion d'occupation estimée à 60%. Cette classe occupe la majorité du Nord et s'étend sous forme de bande longitudinale vers la zone Centre-est, Ouest et Sud du département.

## RESULTATS ET DISCUSSION



**Figure 15 :** Carte d'exploitabilité en eau souterraine du département de Yamoussoukro



**Figure 16 :** Diagramme de répartition des zones d'exploitabilité des ressources en eau souterraine du département de Yamoussoukro

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les paramètres utilisés pour l'exploitabilité ont une incertitude de  $\pm 1$  pour le débit d'exploitation et  $\pm 1,2$  pour le niveau statique, avec respectivement un niveau de confiance de 68% et 99% (Tableaux X). La carte d'exploitabilité a une marge d'erreur de  $\pm 0,004$  avec un niveau de confiance de 99%. Ces valeurs impliquent une fiabilité de la carte thématique exploitabilité en eau souterraine.

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

Paramètres	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
QE	0,51	30,7	6,5	7,1	$\pm 1$	1	68
NS	2,56	45,7	15,1	8,4	$\pm 1,2$	3	99
Exploitabilité	2,5	8,8	7,8	0,9	$\pm 0,004$	3	99

QE : débit d'exploitation ( $m^3/h$ ) ; NS : niveau statique (m)

### 3.1.3.4 Carte des sites potentiels en eau souterraine

L'analyse de la carte des zones favorable à l'implantation des forages à gros débit (Figure 17) montre que le département de Yamoussoukro regorge d'importantes réserves en eau souterraine. En effet, cette analyse décrit les zones favorables à l'implantation des forages à gros débit à travers quatre classes :

- la classe de mauvaise potentialité occupe une faible portion du département avec 3,5% d'occupation (Figure 18). Elle se présente sous forme de poche entre la localité de Bazai et Sahabo, au niveau de Bonzi, au Sud-ouest de Kogoabo et dans l'extrémité Ouest du département ;
- la classe de médiocre potentialité représente 22,3% du département. Cette classe est localisée au Nord-ouest, Ouest, Sud-ouest et dans les extrémités Est du département ;
- la classe à bonne potentialité occupe 36,1% du département. Cette classe est présente en majorité au Nord et à l'Ouest du département. On retrouve également quelques plages dans la partie Centre, Est et Sud du département ;
- la classe à excellente potentialité domine le département avec une proportion de 38,1%. Elle se rencontre dans la partie Centre et Centre-est, et s'étend sous forme de bande longitudinale jusqu'au Sud du département. On la retrouve également disséminée sur l'ensemble du département.

## RESULTATS ET DISCUSSION

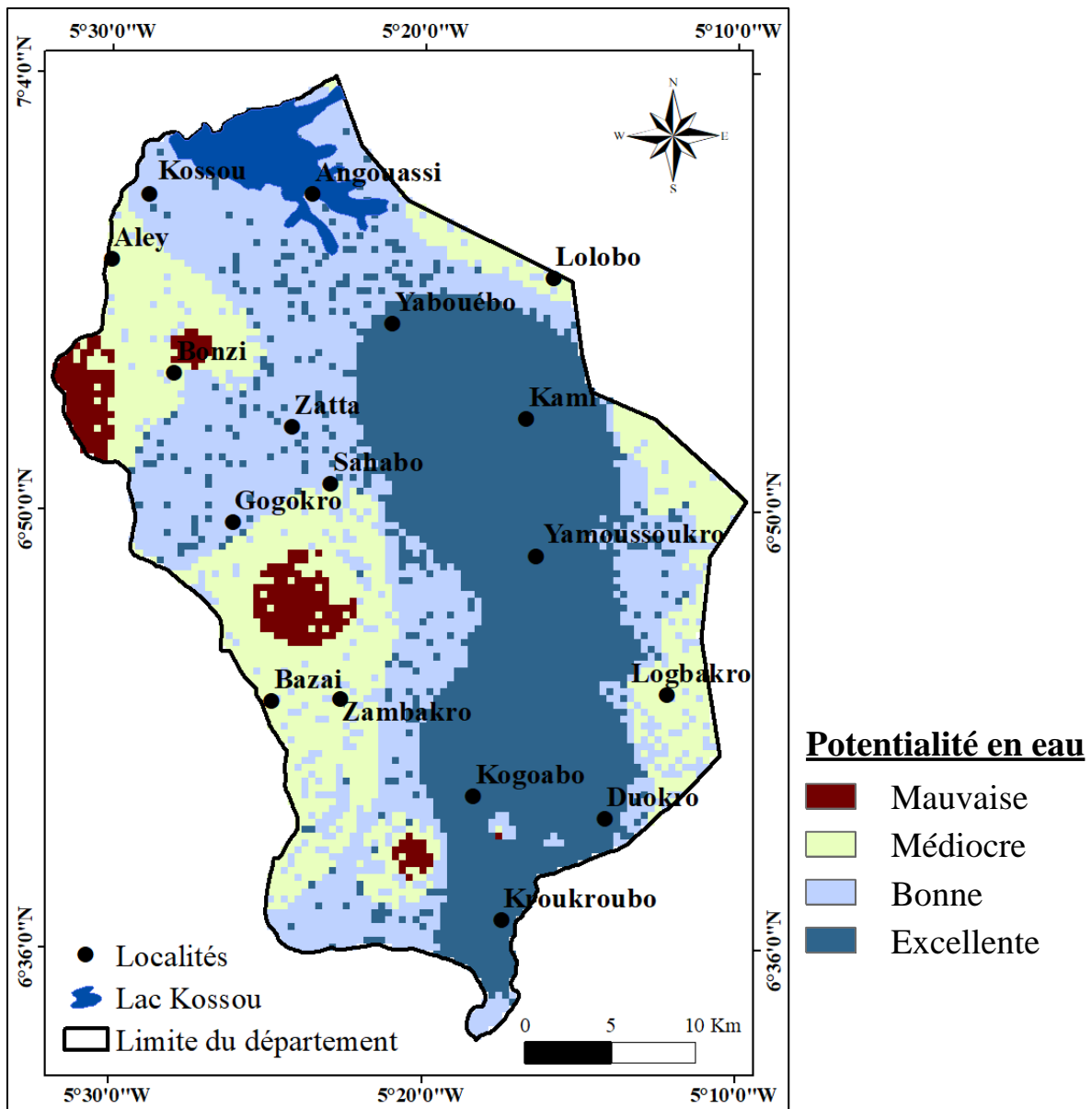


Figure 17 : Carte des zones favorable à l'implantation des forages

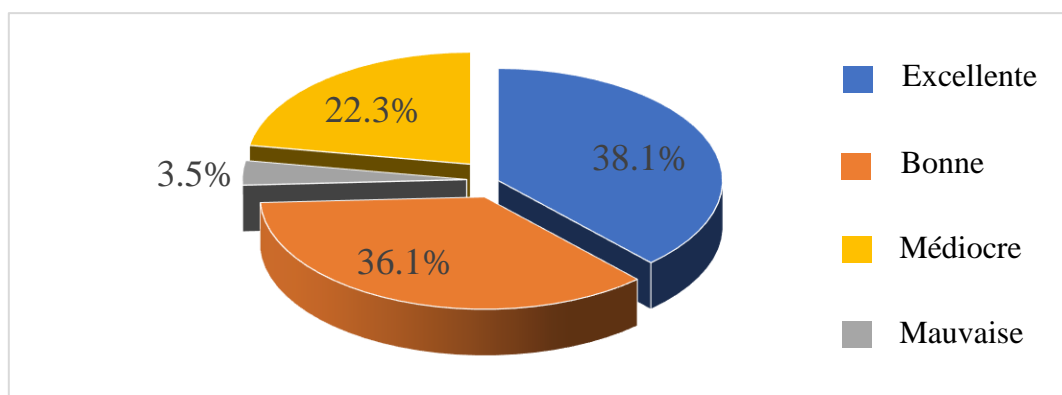


Figure 18 : Diagramme de répartition des zones potentiels en eau souterraine du département de Yamoussoukro

## RESULTATS ET DISCUSSION

La carte des sites potentiels en eau souterraine a également été validée. Le calcul de l'erreur a donné une incertitude de  $\pm 0,005$ , valeur significativement faible avec un niveau de confiance de 95% (Tableaux XI). Le constat de la faible marge d'erreur des trois indicateurs reflète relativement la fiabilité de la carte thématique potentialité en eau souterraine.

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

Paramètres	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
Disponibilité	5,3	9,5	6,8	0,7	$\pm 0,003$	3	99
Accessibilité	1,5	8,5	5,1	1	$\pm 0,004$	3	99
Exploitable	2,5	8,8	7,8	0,9	$\pm 0,004$	3	99
POTENTIALITE	9,6	24,3	19,8	1,8	$\pm 0,005$	3	99

### 3.2 Discussion

A la lumière des résultats présentés, il ressort du bilan hydrologique global que, l'évapotranspiration réelle (ETR) est le terme le plus dominant avec une valeur de 871,5 mm/an, soit 74,5% des précipitations annuelles. L'importance de ce terme sur le département de Yamoussoukro est due à la mise à nu des sols provoquée par la pratique culturale archaïque et la destruction du couvert forestier. Cette valeur reste sensiblement identique à celle obtenue par N'Guessan *et al.* (2014) dans la ville de Yamoussoukro avec 852,66 mm/an. La lame d'eau ruisselée, qui est de 218 mm/an représente 18,63% des précipitations annuelles. Quant à la lame d'eau moyenne infiltrée sur le département, elle représente 6,87% de la précipitation annuelle, soit 80,38 mm/an. Ces valeurs restent dans la même gamme que celles obtenue par N'Guessan *et al.* (2014) avec une valeur de 214,6 mm/an comme lame d'eau ruisselée et 69,98 mm/an comme recharge. Des études similaires ont été réalisées en Côte d'Ivoire par l'approche du bilan hydrologique selon Thornthwaite. Les résultats de ces travaux ont donné une recharge de 43 mm dans le bassin versant de la Mé (Soro, 1987), 46 mm dans le bassin de la Marahoué (Biémi, 1992), 77 mm dans la région d'Odienné (Savané, 1997), 74 mm à Man et 168 mm à Danané (Kouamé, 1999). Ces auteurs avancent donc des valeurs de recharge variées qui fluctuent entre 46 mm et 168 mm par an. L'infiltration obtenue sur le département de Yamoussoukro est comprise dans l'intervalle des estimations avancées par les études antérieures. La valeur de la recharge obtenue, dépendant en plus du contexte géologique, des caractéristiques climatiques de la région, est dans un ordre de grandeur acceptable. Cette valeur montre que l'aquifère du département est fortement alimenté. Cela montre que le département de Yamoussoukro pourrait renfermer d'importantes réserves d'eaux souterraines.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la cartographie des structures linéamentaires obtenus manuellement ont permis de montrer que le département de Yamoussoukro est fortement fracturé. Cette forte densité de fracturation explique les 97% de la surface du département qui est caractérisé par une bonne et excellente exploitabilité des eaux souterraines. En outre, l'analyse statistique du réseau de fracturation a mis en évidence deux directions dominantes que sont les directions N 0-10° (N-S) et N 90-100° (E-O). Ces principales familles directionnelles de fractures sont similaires à ceux obtenus par Daï Bi *et al.* (2018) dans le sillon d'Oumé-Toumodi-Fetêkro (Centre de la Côte d'Ivoire). Les orientations principales obtenues par Daï Bi *et al.* (2018) sont les directions N 0-10° (N-S), N 90-100° (E-O), N100-110°, N 110-120° et N 150-160° (NO-SE). Les directions principales obtenues à partir de la carte détaillée des linéaments ont également été obtenues par Daï Bi *et al.* (2018). Cependant ces directions ne sont pas forcément les plus dominantes chez Daï Bi *et al.* (2018). Cela pourrait être dues, au fait que la carte linéamentaire obtenus n'est pas exhaustive mais représentative de la zone d'étude ; aux biais associés à la mesure de fracturation sur le terrain, puisque les fractures affleurent très rarement et de façon très localisée (Koita, 2010) ou à un effet d'échelle lié aux types d'objets considérés pour la détermination des familles directionnelles puisque les linéaments sur image et fissures sur le terrain peuvent avoir des directions sensiblement différentes (Mangoua, 2013). De plus, l'adéquation entre la superposition des débits des forages implantés par la géophysique avec la carte de fracturation permet de confirmer que les linéaments identifiés sont très vraisemblablement associés à la fracturation. Ceci permet en outre de valider la méthodologie de cartographie de ces fractures. En effet, cette méthodologie a permis de mettre en évidence la carte de fracturation du bassin versant de la Marahoué (Biémi, 1992), de la région d'Odienné (Savané, 1997), de la région de Korhogo (Jourda, 2005), du bassin versant de la Baya (Mangoua, 2013), du bassin de la Lobo (Yao, 2015 ; Kouadio *et al.*, 2020), etc.

La méthode du SIG associée à l'AMC a été appliquée avec succès dans plusieurs régions de la Côte d'Ivoire. Sur le département de Yamoussoukro, elle a abouti à la réalisation de la carte de potentialité à partir des cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine. L'analyse de cette carte de potentialité en eau souterraine montre que, malgré une forte infiltration, plus 80% de la superficie du département est caractérisé par des zones à mauvaise et médiocre disponibilité. Ces résultats 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

## RESULTATS ET DISCUSSION

soit en zone à disponibilité mauvaise ou médiocre. On note également la présence des classes à bonne et excellente disponibilité qui représente près 20% du département. Ces classes sont dues à des zones de faibles pentes avec une forte densité de fracturation qui entrainerait une bonne infiltration des eaux dans l'aquifère (Shankar & Mohan, 2006 ; Doumouya *et al.*, 2012 ; Mangoua, 2013 ; Yao *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2019 ; Mangoua *et al.*, 2019). Cette bonne infiltration découle avant tous 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 (Yao *et al.*, 2012). Dans le département d'Oumé, au Centre de la Côte la d'Ivoire, Youan Ta *et al.* (2015) ont montré que 50% de la zone est caractérisée par une disponibilité de la classe mauvaise à médiocre.

Les zones à excellente et bonne accessibilité couvrent respectivement 45,5% et 29,7% de la superficie du département de Yamoussoukro. Ces zones seraient favorisées par la profondeur totale des forages qui pour la plupart sont moins profonds avec de bons débits. Les classes mauvaise et médiocre accessibilité occupent respectivement 4,1% et 20,3% du département. Ces résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par Yao (2015) dans le bassin versant de la Lobo (centre-ouest de la Côte d'Ivoire) avec 69,7% de la classe excellente accessibilité, 21,5% de la classe bonne et 8,4% de la classe médiocre et mauvaise accessibilité.

L'exploitabilité est dominée par 60% de la classe excellente et 37% de la classe bonne. Cette prédominance est favorisée par les formations essentiellement granitoïdes qui sont présentes sur plus de 90% de la superficie du département de Yamoussoukro. Cette bonne exploitabilité des eaux des granitoïdes pourrait également être liée à la forte densité de fracturation, qui représente plus de 55% du département de Yamoussoukro. En effet, selon N'Go *et al.*, (2005) les granites et les schistes constituent les formations lithologiques généralement très productifs. Les zones à potentialité mauvaise représentent 3,5% du département. Ces zones sont caractérisées par une disponibilité mauvaise à excellente, avec une accessibilité et une exploitabilité mauvaise à médiocre. Ces zones sont alors difficiles d'accès, avec des débits d'exploitations faibles. Elles ne conviennent pas à l'implantation de forages car elles appartiennent à la zone non convenable et sont donc fortement déconseillées. Les zones à médiocre potentialité occupent 22,3% du département. Elles sont caractérisées par une disponibilité mauvaise à excellente, une accessibilité médiocre à bonne et une exploitabilité bonne à excellente par endroit. Ces zones appartiennent à la classe acceptable à cause de leur débit. Elles peuvent être conseillées pour l'implantation des forages dans le cadre de l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise améliorée.



## RESULTATS ET DISCUSSION

Les zones à bonne potentialité occupent 36,1% du département. Elles sont caractérisées par une disponibilité mauvaise à excellente, une accessibilité et une exploitabilité bonne à excellente. Ces zones appartiennent à la classe convenable et sont conseillées pour l'implantation des forages dans le cadre de l'hydraulique villageoise améliorée et de la recherche des zones à gros débit. Les zones à excellente potentialité dominent le département avec une proportion de 38,1%. Cette classe se caractérise par une disponibilité mauvaise à excellente, une accessibilité bonne à excellente et une exploitabilité excellente. Ces zones appartiennent à la classe convenable et sont fortement conseillées lors de l'implantation des forages à gros débit.

Le département de Yamoussoukro regorge d'importantes réserves en eau souterraine avec plus de 95% de zone favorable à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise amélioré. Près de 75% de ces zones sont favorables à l'implantation des forages à gros débits. Ces zones sont les plus recherchées pour l'approvisionnement en eau potable des grands centres urbains comme c'est le cas de la ville de Yamoussoukro.

Ces résultats sont proches de celles obtenus par Youan Ta *et al.*, (2015) dans le département de Oumé (Centre-est de la Côte d'Ivoire) avec 4,83% de la classe à mauvaise potentialité, 36% de la classe à Médiocre potentialité, et 58,25% des classes à bonne et excellente potentialité.

La validation des cartes thématiques réalisées dans cette étude par le calcul des incertitudes se justifie par le fait que le mode d'évaluation par les courbes de tendances proposé par Jourda (2005) a montré ses limites. En effet, il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100% la réalité du terrain, en ce sens qu'à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul. C'est pour pallier à ces insuffisances que, certains auteurs (Samake *et al.*, 2011 ; Doumouya *et al.*, 2012 ; Mangoua, 2013) préconisent l'utilisation de tests de sensibilité et de calcul des incertitudes permettant de classer les différents paramètres utilisés par ordre d'importance dans l'élaboration des cartes de potentialité en eau. La grande faiblesse des incertitudes calculées dans cette étude permet d'affirmer la fiabilité des données utilisées. Ainsi, cette carte thématique des sites potentiels en eau souterraine du département de Yamoussoukro peut guider à la prise de bonne décision lors de la recherche des zones pour l'implantation des forages à gros débit.

Il faut noter, que l'usage du SIG à travers la méthode d'interpolation utilisée pour la réalisation des différentes cartes, peut souvent présenter des limites dans le choix du nombre de classe à interpréter.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Au terme de cette étude, nous retenons que les paramètres du bilan hydrologique ont été évalués sur le département de Yamoussoukro. L'évapotranspiration réel (ETR) estimée à 871,5 mm/an, soit 74,5 %, constitue la fraction la plus importante des précipitations annuelles sur le département. La lame d'eau infiltrée est de 80,38 mm/an, soit 6,87% de la pluie tombée sur le département. Elle contribue fortement à la recharge des nappes. L'analyse statistique de la carte détaillée des linéaments du département de Yamoussoukro a révélé 922 linéaments extraits manuellement, avec une longueur cumulée de 1640 km. Cette analyse a montré que le département de Yamoussoukro est fortement fracturé, et a mis en évidence deux directions dominantes que sont les directions N 0-10° (N-S) et N 90-100° (E-O). L'étude cartographique du potentiel en eau souterraine a révélé que, les zones de mauvaise potentialité occupent 3,5% de la superficie du département, 22,3% du département est occupé par les zones de médiocre potentialité, les zones à bonne potentialité représentent 36,1%, et ceux d'excellente potentialité sont occupées par 38,1% de la superficie du département. Ces différents résultats ont montré que le département de Yamoussoukro regorge d'importantes réserves en eau souterraine avec plus de 90% de zone favorable à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise amélioré. Et près de 75% de ces zones sont favorables à l'implantation des forages à gros débits, nécessaires pour l'alimentation des grands centres urbains.

Pour une meilleure exploitabilité des zones potentiellement favorables à l'implantation de forage (éventuellement à gros débit), il faut :

- ✚ Utiliser la géophysique en complément lors de la réalisation des forages ;
- ✚ Établir des périmètres de protection autour de ces zones à forer ;
- ✚ Faire une étude piézométrique approfondie sur une longue période pour une meilleure connaissance de la variation du niveau d'eau dans le système aquifère du département ;
- ✚ Etudier la productivité du système aquifère pour améliorer l'approvisionnement en eau potable ;
- ✚ Utiliser un modèle d'écoulement pour une meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques ;
- ✚ 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

- Alassane A. (2004). Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Dakar, Sénégal), 145 p.
- Banks D. & Frengstad B. (1998). The chemistry of Norwegian groundwaters. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *The Science of Total Environment*, 222 : 71-91.
- 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.
- Cirad (2000). Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs. Manuels de critères et indicateurs pour la gestion durable des forêts, 84 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.
- Daï Bi S.M., Ouattara G., Koffi G.B., Gnanzou A., Coulibaly I. (2018). Mise en évidence de nouvelles structures géologiques dans la région de Brobo (Centre de la Côte d'Ivoire). Aide à la compréhension de la tectonique du Paléoprotérozoïque du craton Ouest-Africain. *European Scientific Journal*, 24(1) : 74-93.
- DHH (2001). Hydraulique Humaine en Côte d'Ivoire. Ministère des Infrastructures Economiques, Direction de l'Hydraulique Humaine, Abidjan, 66 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.
- Diluca C. & Muller M. (1985). Evaluation hydrogéologique des projets hydrauliques en terrains cristallins du bouclier Ouest Africain. Comite Interfricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Ouagadougou (Burkina Faso), 128 p.

## REFERENCES

- 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.
- Dubois J. (1999). Identification des linéaments dans les images satellitaires par ajustement et suivi de segment. Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 123 p.
- El Hadani D. (1997). Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. Remote Sensing and Geographic information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems. *IAHS Publication*, 242 : 197-204.
- El Morjani Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de Doctorat, Université de Genève (Genève, Suisse), 300 p.
- Houmed-Gaba A. (2009). Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (corne de l'Afrique). Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (Poitiers, France), 194 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.
- Jarar O.H., Benslimane A., Benaabidate L. & Eljaafari S. (2005). Elaboration d'un S.I.G. pour la gestion des ressources en eau des bassins versants de Ziz et Rbéris. Manuscrit, 10 p.
- Joseph K., Pétanhangui A.Y., & Youssef N.K. (2018). L'eau est une préoccupation majeure en Côte d'Ivoire. Dépêche, Abidjan (Côte d'Ivoire), 8p.
- 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.
- Koita M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre-est de la

## REFERENCES

- Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 220 p.
- Kouadio J.O.K., Dibi B., Mangoua M.J., Konan-Waidhet A. B. and Kamagaté B. (2020). Contribution of Sentinel Radar Images 1A to the Extraction of Lineaments from the Lobo Watershed (Center-West of the Ivory Coast). *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 24(8): 11-25.
- Kouadio E.K., Savané I., Lasm T. & Biémi J. (2008). Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metamorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential. *European Journal of Scientific Research*, 22(3) : 373-390.
- Kouamé K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 194 p.
- Kouassi A.M., N'guessan B.T.M., Kouamé K.F., Kouamé K.A., Okaïgni J.C., Biémi J. (2012). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes rendus Géoscience*, 344 : 288-296.
- Kouassi W.F., Kouassi K.A., Mangoua M.J., Kamenan Y.M. & Kouadio Z.A. (2019). Evaluation des potentialités en eau souterraine de la portion Ivoirienne du bassin versant du Niger. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25(2) : 774-784.
- 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.
- Mahé G., Dessouassi R., Bandia C. & Olivry J.C. (1998). Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. *International Association of Hydrological Sciences*, 252 : 289-295.

## REFERENCES

- 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.
- Mangoua M.J., Yao A.B., Douagui G.A., Kouassi K.A., Goula B.T.A., Biémi J. (2019). Évaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissures dans le bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss journal*, 37 : 53-74.
- 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 : 451-460.
- Maystre L.Y., Lucien Y., Pictet J., & Simos J. (1994). Méthodes multicritères ELECTRE : Description, conseils, pratique et cas d'application à la gestion environnementale. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (France), 319 p.
- 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.
- Mégny C. (1979). Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. *Mémoire BRGM*, 98 : 144-149.
- Mogaji K.A., Aboyeji O.S. & Omosuyi G.O. (2011). Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote sensing and geographic information system (GIS) techniques. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 3(7) : 150-160.
- Neves M.A. & Morales N. (2007). Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil. *Hydrogeology Journal*, 15 : 471-482.
- N'go Y.A., Goné D.L., Savane I. & Goblé 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'go Y.A., Lasm T., Koita M. & Savané I. (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 9(1) : 33-42.



## REFERENCES

- N'guessan K.A., Kouassi A.M., Gnaboa R., Traoré K.S., Houenou P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé : cas de la ville de Yamoussoukro (Centre de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 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.
- 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.
- Pinatibi H., Coulibaly N., Coulibaly T.J.H., Savane I. (2015). Cartographie des potentialités en eaux souterraines par l'utilisation de l'analyse multicritère et les SIG : cas du district du Denguélé (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 11 : 106-122.
- Prasad R.K., Mondal N.C., Pallavi B., Nandakumar M.V. & Singh V.S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard 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.
- Razack M. (1984). Application des méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Montpellier 2 (Montpellier, France), 384 p.
- Renault C. (2003). Analyse multicritère : Etude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie. CIRANO, Scientific Series, Montréal (Canada), 52 p.
- Robert B., Alves D., Latorre C., Macleod N., Payen G., Roaf V. & Rouse M. (2018). Manuel des Droits de l'Homme à l'Eau Potable et à l'Assainissement à l'intention des Praticiens. IWA (International water Association) Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street London, Londre (Royaume-Uni), 124 p.
- Saaty T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of services Sciences*, 1(1) : 83-98.
- 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

## REFERENCES

- (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 209 p.
- Samake M.B., Laing Z.T., N'doh M.W.I., Kasereka K., & Balogun W.O. (2011). Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifers in Linfen Basin, Shanxi Province, China using DRASTIC model. *Journal of Sustainable Development*, 4(1) : 53-71.
- 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.
- 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.
- 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.
- Soro N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé). Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu (France, Grenoble), 239 p.
- Soro G., Soro N., Ahoussi K.E., Lasm T., Kouamé F.K., Soro T.D. & Biémi J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphique dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *Estudios Geológicos*, 66(2) : 227-242.
- Stary B. (1985). Du village à la capitale : L'émergence de Yamoussoukro à travers la presse et le discours officiel ivoirien, mémoire de maîtrise de géographie, paris (France), 288 p.
- Thorntwaite C. W. (1954). An approach toward a rational classification of climate. *Transaction American Geophysics Union*, 27 : 55-99.
- Wyns R. (1998). PRD324. Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride Ouest. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central).

## REFERENCES

- Yacé I. (1976). Le volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fétékro en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (d'Abidjan, Côte d'Ivoire), 373 p.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kane 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.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kane A., Mangoua M.J. & Kouassi K.A. (2016). Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-ouest, Côte d'Ivoire). Approche par analyse multicritère. *Hydrological sciences journal*, 61 : 856-867.
- Yao (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 225 p.
- Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.
- Youan Ta M., Lasm T., Jourda J.P., Kouamé K.F. & Razack M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 8(2) : 119-135.
- Youan Ta M., Lasm T., Jourda J.P., Saley B.M., Adja M.G., Kouamé 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.
- Youan Ta M., Yao K.A.F., Baka D., De Lasme Z.O., Lasm T., Adja M.G., Kouakou S., Onetie Z.O., Jourda J.P. & Biémi J. (2015). Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages a gros débits en milieu fissure par analyse multicritère : cas du département d'Oumé (Centre-ouest de la Cote d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 23 : 155-181.

## **RESUME**

Dans la région des Lacs, 65% des forages réalisés ont été un échec. De plus, avec la demande croissante en eau de la capitale politique (Yamoussoukro), le taux de satisfaction des besoins en eaux potables de cette région pourrait être impacté considérablement. L'objectif principal de cette étude est de cartographier les zones favorables à l'implantation des forages à gros débit dans le département de Yamoussoukro. Les données hydro-climatiques, cartographiques et des forages ont permis de réaliser cette étude. La recharge a été évaluée à l'aide du bilan hydrologique. Le SIG associé à la télédétection et l'AMC ont permis d'élaborer la carte détaillée des structures linéamentaires et la carte des zones favorables à l'implantation des forages à gros débit. Les résultats obtenus ont montré que 6,87% de la pluie alimente les eaux souterraines, soit 80,38 mm/an. Ces résultats ont ensuite montré que le département de Yamoussoukro est fortement fracturé, avec une dominance des directions N-S (N 0-10°) et E-O (N 90-100°). Enfin, ces résultats ont montré que le département de Yamoussoukro regorge d'importantes réserves en eau souterraine avec plus de 90% de zone favorable à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise et l'hydraulique villageoise amélioré. Et près de 75% de ces zones sont favorables à l'implantation des forages à gros débits.

**Mots clés** : Aquifère-fissuré, Potentialité, Analyse multicritères, fracture, Yamoussoukro.

## **ABSTRACT**

In the Lakes region, 65% of the boreholes drilled have failed. Moreover, with the growing demand of water in the political capital (Yamoussoukro), the rate of satisfaction of drinking water needs in this region could be significantly impacted. The main objective of this study is to map the areas that are favorable for the implementation of large boreholes in the department of Yamoussoukro. Hydro-climatic, cartographic and borehole data were used to carry out this study. Recharge was assessed using the hydrological balance. The GIS associated with remote sensing and the AMC allowed to develop the detailed map of the lineamentary structures and the map of the zones favourable to the implantation of large flow drillings. The results obtained showed that 6.87% of the rainfall feeds the groundwater, i.e. 80.38 mm/year. These results also showed that the Yamoussoukro department is strongly fractured, with a dominance of N-S (N 0-10°) and E-W (N 90-100°) directions. Finally, these results showed that the department of Yamoussoukro has significant groundwater reserves with more than 90% of the area suitable for drilling in the context of village water supply and improved village water supply. And nearly 75% of these areas are favorable to the implementation of large flow boreholes.

**Key words** : Fissured aquifer, Potentiality, Multicriteria analysis, fracture, Yamoussoukro.