CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES D'IMPLANTATION DES FORAGES HYDRAULIQUES DANS LA RÉGION DE GBÊKÊ (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)

MAPPING OF POTENTIAL AREAS FOR WATER DRINKING IN THE GBÊKÊ REGION (CENTRAL IVORY COAST)

SAMAKÉ Yacouba[1] ; **AFFRO** Mathieu Jonasse[2] ; **SORO** Nambégué[3]

1. Doctorant, Université Alassane Ouattara, 01 BP V18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire, behsamake@gmail.com
2. Enseignant-chercheur, Université Alassane Ouattara, 01 BP V18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire, affrojonasse@gmail.com
3. Enseignant-chercheur, Université Alassane Ouattara, 01 BP V18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire, nambeguesoro@yahoo.fr

RESUME

La forte croissance démographique a accru considérablement les besoins en eau de consommation. En dépit des efforts de l'Etat en vue de fournir de l'eau potable aux populations, la situation demeure critique en raison de l'insuffisance des infrastructures hydrauliques de sorte qu'un grand nombre de foyers ruraux ont recours à des solutions de fortune (puits villageois, mais aussi l'eau des marigots) ; ce qui a pour effet la multiplication des maladies liées à l'eau (maladies diarrhéiques, onchocercose, ver de guinée, etc.). Il est de notoriété publique que la mise en place des forages à fort potentiel hydraulique reste une alternative. L'objectif de cette étude est de cartographier les zones potentielles à forte productivité hydraulique en milieu rural de Gbêkè par télédétection et SIG. Cette étude s'appuie exclusivement sur l'analyse des données satellitaires (LANDSAT 8 et STRM-MNT) et leurs traitements par SIG. L'analyse et l'interprétation des résultats ont permis de mettre en évidence les zones potentielles de recharge de la nappe. Celles-ci représentent 65,21% de la superficie régionale. Ces régions sont essentiellement dans le Sud-Ouest avec des apparitions de part et d'autre de la région.

Mots-clés : Nappe phréatique, Recharge ; Région de Gbêkè ; SIG ; Télédétection

ABSTRACT

Rapid population growth has significantly increased the need for drinking water. Despite government efforts to provide drinking water to the population, the situation remains critical due to insufficient water infrastructure, forcing many rural households to resort to makeshift solutions (village wells and water from streams); this has led to a rise in waterborne diseases (diarrheal diseases, onchocerciasis, Guinea worm, etc.). It is widely known that drilling wells with high hydraulic potential remains an alternative. The objective of this study is to map areas of high hydraulic productivity in rural Gbêkè using remote sensing and GIS. This study relies exclusively on the analysis of satellite data (LANDSAT 8 and STRM-MTE) and their processing using GIS.Analysis and interpretation of the results have highlighted potential groundwater recharge zones. These represent 65.21% of the regional area. These regions are primarily located in the southwest, with occurrences on both sides of the region.

Keywords: Groundwater, Recharge; Gbêkè Region; GIS; Remote Sensing

INTRODUCTION

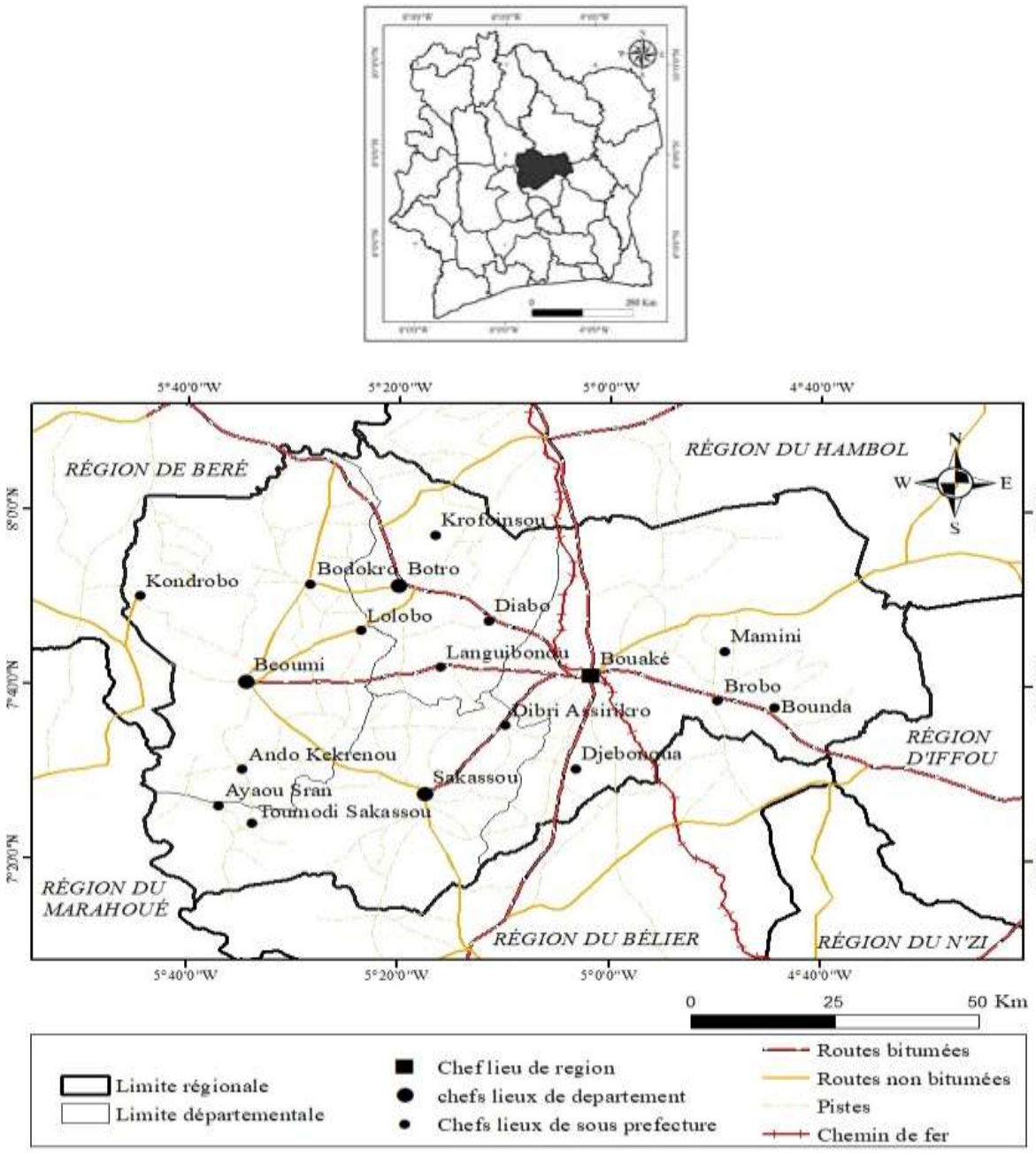
Les sécheresses assez prononcées comme ce fut le cas au cours des périodes 1972-1973 et 1981-1983 ainsi que les changements climatiques constatés depuis 1981 dans les pays d'Afrique de l'Ouest, ont provoqué un tarissement généralisé de la majorité des points d'eau de surface (B. DIBI et *al.*, 2004, p. 23). Depuis ces périodes, les investigations vers les eaux souterraines dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest se sont accentuées. En Côte d'Ivoire, l'Etat a initié à partir de 1973, un programme national d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement. Ce programme visait à capter les ressources en eau contenue dans les réservoirs de socle fracturé bien qu'aucune étude détaillée de ces réservoirs n'ait été faite pour évaluer les capacités exactes (M. KOITA, 2010, p. 1). En 1985, ce programme a permis la réalisation de plus de 12000 ouvrages de captage dans près de 8000 villages (K. E. AHOUSSI et *al.*, 2012, p. 52). La région de Gbêkê n'est pas en marge de cette volonté étatique. En plus du Programme National d'Hydraulique Humaine (PNHH) de 1973, elle a bénéficié des dotations de l'Etat ivoirien et de l'un de ses partenaires au développement. En effet, au cours de la période 2013-2017, l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA), l'un des partenaires au développement de l'Etat ivoirien, a réalisé 29 pompes à motricité humaine et réhabilité 49 pompes dans 29 villages de la région (JICA, 2017, pp. 138-142). En plus, l'Etat ivoirien à travers le ministère de l'hydraulique, a lancé le projet de renforcement de l'Alimentation en Eau Potable (AEP) dans la région en 2020 pour un coût global de 169 286 283 865 FCFA (MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE ; 2020, p. 3). Ce projet s'inscrit dans le contexte de la résolution de la crise d'approvisionnement en eau qu'a connu cette région en 2018. Malgré ces réalisations, le service public de distribution d'eau dans la région se caractérise par une intermittence avec des baisses de pression allant souvent jusqu'à la coupure d'eau. Par conséquent, l'exploitation des eaux souterraines s'est considérablement intensifiée dans la région. Mais cette exploitation s'effectue dans un contexte méconnaissance de la recharge de la nappe phréatique. Ainsi, cette étude vise à identifier les zones potentielles de recharge de la nappe phréatique dans la région de Gbêkê.

2. METHODOLOGIE

2.1. Présentation de la zone d'étude

La région du Gbêkê est située dans le Centre de la République de Côte d'Ivoire (carte 1). Elle est comprise entre les latitudes 7°24′ et 8°16′ Nord et les longitudes 4°50′ et 5°80′ Ouest. Elle s'étend sur une superficie de 9136 Km² soit 2,83% de la superficie du territoire national. Elle appartient au régime pluviométrique équatorial de transition atténué à deux saisons humides et deux saisons sèches. La région de Gbêkê est localisée dans cette zone pré forestière. Elle est composée d'une mosaïque de forêt naturelle et de savane pré forestière. Elle occupe l'interfluve Bandama-N'Zi. Elle est

marquée par un relief relativement plat sur la frange sud, s'élevant progressivement vers le Nord et l'Est.La région est parcourue par les affluents des fleuves Bandama et N'Zi.Ttrois (3) types de sols, souvent marqués par les horizons indurés, sont distinctifs. Ce sont les sols ferrallitiques moyennement désaturés et/ou faiblement désaturés ; les sols bruns tropicaux et les sols hydromorphes minéraux. La région est localisée dans deux types de formations géologiques, un ensemble plutonique et un ensemble métamorphique.



Source : CNTIG, 2017 et réalisation : SAMAKÉ Y., 2021

Figure1 : carte de la localisation de la région de Gbêkê

2.2. Matériels et méthodes de l'étude

2.2.1 Matériels de l'étude

Cette étude a eu recours à deux (2) types de données à savoir les images satellitaires et les cartes thématiques existantes. Les images satellitaires sont une image STRM-MNT et une image LANDSAT 8 OLI/TIRS. Elles ont été fournies par l'institut géologique USGS respectivement en 2020 et en 2022. Les cartes thématiques existantes sont le contour administratif, les cartes pédologiques et géologiques de la Côte d'Ivoire. Le contour administratif est celui de 2017 obtenu auprès du Comité National de Télédétection et de l'Information Géographique (CNTIG). La carte pédologique est celle de A. PERRAUD élaborée en 1971 à l'échelle 1/2000000. La carte géologique est celle réalisée par B. TAGINI en 1972 à l'échelle 1/200 000.

2.2.2 Méthodes d'analyse des données

Les méthodes utilisées sont basées la télédétection et le Système d'Information Géographique (SIG). Elles ont nécessité cinq (5) étapes résumées à l'identification des critères, la cartographie et la classification des critères, la pondération des critères et le croisement des critères.

2.2.3 Identification des critères

L'identification des zones potentielles de recharge de la nappe phréatique implique six (6) principaux facteurs ou critères à savoir : l'occupation du sol, le type de sol, la pente ou la topographie, la densité de drainage, la couche lithologique et l'infiltration efficace.

2.2.4 Cartographie et classification des critères

Occupation du sol (Os)

La carte de l'occupation du sol s'est réalisée à l'aide de l'image satellitaire LANDSAT 8 OLI/TIRS. Après son prétraitement, une composition colorée a été appliquée à cette image afin d'améliorer la visibilité de ses contrastes. Cette technique a consisté à combiner les trois bandes aux couleurs primaires dont les bandes OLI4/OLI3/OLI2. Par la suite, la classification supervisée par maximum de vraisemblance a été réalisée pour la classification les entités spatiales, la validation des classes et l'analyse de la matrice de confusion.

Type de sol (S)

La carte des types de sols a été obtenue à partir de la carte pédologique de la Côte d'Ivoire de A. PERRAUD (1971). Elle a été réalisée par la numérisation des types de sols de la zone d'étude.

Pente (P)

La pente est l'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale. C'est l'un des facteurs déterminants dans la mobilisation et dans la circulation de l'eau. Elle a été établie grâce à la monobande STRM-MNT. Après son élaboration, les inclinaisons ont été classées selon la classification proposée par SOTER (Commission européenne des sols) en 1995 conformément au tableau I suivant.

Tableau I : Classification de la pente selon le modèle SOTER

Pente (%)	Description	Potentialité de stockage
< 2	Plate	Très élevée
2 – 8	Vallonnée	Elevée
8 – 15	Roulante	Modérée
15 – 30	Peu raide	Faible
> 30	Raide	Très faible

Source : N. NOUATY et *al.*.(2017, p. 52)

Densité de drainage (Dd)

Cette densité a été obtenue à l'aide de la carte du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique de la zone d'étude a été établi à la suite d'une série d'étapes de traitement de l'image STRM-MNT. Ce traitement numérique s'est fait de manière automatique.la classification s'est faite selon la hiérarchisation des ordres d'écoulement de STRAHLER (1957).

Lithologie (L)

La carte lithologique a été obtenue à partir de la carte géologique de la Côte d'Ivoire de B. TAGINI (1972). Elle a été réalisée par la numérisation des types de formation géologique de la zone d'étude. Après avoir cartographié les facteurs qui influencent la recharge de la nappe, il convient à présent de les reclasser. La reclassification des cartes paramétriques consiste à définir le degré d'infiltration des classes de chaque facteur ou carte paramétrique. Elle s'est opérée selon cinq (5) classes qualitatives, qui sont : *très faible, faible, moyenne, forte et très forte*. Ceci dans l'optique d'une meilleure combinaison des différentes variables.

La reclassification est suivie de la codification. La codification est l'opération qui consiste à transcrire par des symboles (chiffres), les différentes classes afin que celles-ci puissent être reconnues par le programme informatique (le logiciel). En effet, les classes de chaque carte paramétrique sont encodées selon leurs influences dans la recharge. Cependant, une échelle de notation variant de 1 à 10 a été retenue. Le code de 10 est attribué à la classe lorsqu'elle est qualifiée de « très faible » ou « très forte » pour sa contribution extrême dans le processus de la recharge. Dans le cas contraire, la classe est affectée d'un code de 1. Dans cette logique, les valeurs intermédiaires sont attribuées aux classes intermédiaires selon une distribution linéaire. Le but de cette

codification ou standardisation est purement technique. En effet, la codification ou la standardisation constitue un langage informatique. Elle permet au logiciel de faire la distinction des classes suivant un jugement graduel lors de la combinaison des cartes paramétriques.

Infiltration efficace (Ie)

Cet indicateur climatique a été déterminé à l'aide de l'équation simplifiée du bilan hydrologique à l'exemple de plusieurs auteurs (B. M. S. ABDOU, 2012, p. 83 ; A. E. ASSEMIAN, 2014, p. 58 et K. KONE, 2022, pp. 51-52) selon l'équation 1 suivante :

$$Ie = P-(ETR+R) \qquad \text{(Equation 1)}$$

Ie : Infiltration efficace moyenne annuelle en mm ; P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm ; ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm ; R : Ruissellement en mm.

L'Evapotranspiration Réelle (ETR) est sensiblement liée à l'Evapotranspiration Potentielle (ETP). L'ETP est la valeur maximale possible de l'évapotranspiration dans des conditions climatiques données (A. KAWALEC, 1980, p. 20). Dans cette étude, les valeurs de l'ETP ont été obtenues par la méthode de THRONTHWAITE (1948). La formule est l'équation 2 suivante :

$$ETP = 16\left(\frac{10t}{I}\right)^{a} K \qquad \text{(Equation 2)}$$

Avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle (mm / mois)
- t : température moyenne mensuelle (°C)
- a : fonction complexe de l'indice thermique(a= 6,75 ×10-7×I3-7,71×10-5×I² + 1,79×10-2×I+0,49)
- K : Coefficient de correction dépendant de la latitude et donné par une table. La valeur de l'ETP annuelle est la somme des 12 valeurs d'ETP mensuelles.
- I : Indice thermique annuel est calculé selon l'équation 3 suivante :

$$I = \sum_{i=0}^{12} i \qquad \text{(Equation 3)}$$

i : indice mensuel calculé à partir des températures moyennes mensuelle selon l'équation 4 :

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \qquad \text{(Equation 4)}$$

Le ruissellement (R) a été estimé selon le modèle de TIXERONT (1963) amélioré et utilisé par S. MOUELHI (2003, p. 56) selon la formule de l'équation (5) suivante :

$$R = [P^4 + (a\,ETP)^4]^{1/4} - a\,ETP \qquad \text{(equation 5)}$$

2.2.5 Pondération des critères

La pondération consiste à attribuer un poids ou un coefficient à chaque critère. Le coefficient traduit l'importance du critère dans l'expression de la recharge. A cet effet, la méthode d'analyse multicritère AHP (Analytic Herarchy Process) développée par SAATY (1977) a été utilisée. C'est une méthode d'aide à la prise de décision pour déterminer les poids des critères. Les poids sont déterminés selon une échelle numérique de comparaisons par paires présentée par le tableau II ci-après.

Tableau II : Expression qualitative et numérique de l'importance relative d'une paire de critères

Note de la comparaison par paire des critères	Expression d'un critère par rapport à un autre	Explication
1	Importance égale	Deux critères contribuent de la même façon à l'objectif
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un critère par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement un critère par rapport à un autre.
7	Importance très forte ou attestée	Un critère est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue	Les preuves favorisant un critère par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.

2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Source : SAATY (1991) cité par A. NOURANI et *al.,* (2016, p. 6) et A. RAMOS et *al.,* (2014, p. 37)

Ce tableau permet de calculer les vecteurs propres (Vp) et de déduire les coefficients de pondération (Cp). Les vecteurs propres sont calculés selon l'équation 6 suivante :

$$Vp = \sqrt[k]{W1 \text{ x } \dots \text{ x } Wk} \qquad \text{(Equation 6)}$$

Avec Vp : vecteur propre ; W : note de la comparaison ; k : le nombre de critères considérés.

Les coefficients de pondération sont calculés selon l'équation 7 suivante :

$$Cp = \frac{Vp}{\sum Vp} \qquad \text{(Equation 7)}$$

Avec Cp : coefficient de pondération et Vp : vecteur propre. Le tableau III montre la matrice de Comparaison.

Tableau III: Matrice de comparaison de l'indicateur de zones potentielles de recharge

Critères	**Os**	**P**	**DD**	**LS**	**LP**	**Ie**	**Vecteur propre (Vpi)**	**Coefficient de pondération (Wi)**
Os	1	1/2	2	1/4	1/5	1/7	0,4388	0,0517
P	2	1	3	1/3	1/4	1/5	0,6813	0,0803
DD	1/2	1/3	1	1/5	1/6	1/7	0,3043	0,0359
LS	4	3	5	1	1/2	1/3	1,4678	0,1730
LS	5	4	6	2	1	1/2	2,2209	0,2617
Ie	7	5	7	3	2	1	3,720	0,3974

Source : Traitement de données cartographiques ; 2024

Après le renseignement de la matrice de comparaison, il est nécessaire de vérifier la cohérence des jugements. Cette vérification passe par la détermination du ratio de cohérence **(RC)** qui doit être inférieur ou égal à 10%. Dans le cas contraire, les jugements sont incohérents et doivent être reconsidérés ou révisés (E. J. DJEMIN, 2022, p. 69). La détermination du ratio de cohérence **(RC)** implique le calcul de l'indice de cohérence. Ces deux (2) paramètres sont obtenus à travers les équations 8 et 9 ci-après :

$$IC = \frac{\lambda \max - K}{K-1} \qquad \text{(Equation 8)}$$

Avec IC : l'indice de cohérence ; λmax : la valeur propre maximale des éléments comparés et K : le nombre d'éléments comparés.

$$RC = \frac{IC}{IA} \qquad \text{(Equation 9)}$$

Avec **RC** : le ratio de cohérence ; **IC** : l'indice de cohérence et **IA** : l'indice aléatoire (fixé à 1,12 pour cinq critères considérés). Dans cette étude, l'indice de cohérence **(IC)** est de 0,08 et le ratio de cohérence **(RC)** est égal à 0,072 soit 7%. Cette valeur du ratio de cohérence **(RC)** est inférieure à 10% donc les jugements sont cohérents. Le tableau 4 contient les classes, les degrés d'infiltration, les codes et les pondérations des cartes paramétriques des zones potentielles de recharge Tableau IV.

Tableau IV : Reclassification, codification et pondération des critères de l'indicateur de zones potentielles de recharge

Critères	Classes	Degrés d'infiltration	Codes	Pondérations (%)
Occupation du sol	Eau	Très faible	1	5,17
	Habitats et sols nus	Faible	3	
	Savane	Moyen	5	
	Cultures et jachères	Fort	8	
	Forêt	Très fort	10	
Pente (%)	< 3,6	Très faible	10	8,03
	3,7 – 6,8	Faible	8	
	6,9 – 12	Moyen	5	
	13 – 23	Fort	3	
	> 24	Très fort	1	
Lithologie superficielle	Cuirasses et sols lithiques	Très faible	1	17,30
	Hydromorphes à gley	Faible	3	
	Bruns eutrophes	Moyen	5	
	Ferrallitiques	Fort	8	
Densité de drainage (Km*Km²)	< 1,2	Très faible	10	3,59
	1,3 – 1,9	Faible	8	
	2 – 2,6	Moyen	5	
	2,7 – 3,6	Fort	3	
	> 3,7	Très fort	1	

Lithologie profonde	Plutoniques (granites)	Faible	3	26,17
	Métamorphiques schisteuses	Moyen	5	
	Volcano-sédimentaires	Fort	8	
Infiltration efficace	274 – 347	Très faible	1	39,74
	348 – 420	Faible	3	
	421 – 492	Moyen	5	
	493 – 565	Fort	8	
	566 – 638	Très fort	10	

Source : Traitement de données, 2024

2.2.6 Croisement des critères

Le croisement des critères est la combinaison des critères selon leurs coefficients afin d'obtenir l'indicateur composant de ces critères. La méthode d'agrégation des critères par pondération a été utilisée pour le croisement des critères. Elle consiste à faire sommer des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration d'un indicateur donné (M. YOUAN TA et *al.,* 2015, p. 168) à travers l'équation (10) suivante :

$$S = \sum_{i=2}^{n} WiXi \quad \text{(Equation 10)}$$

Avec S : le résultat ou indice de l'indicateur ; Wi : le poids du critère i et Xi : la valeur standardisée du critère i. La carte de zones potentielles de recharge obtenue à la suite de cette agrégation a fait l'objet d'une reclassification de cinq (5) classes, en fonction du degré de recharge. Ce sont : très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

2.2.7 Validation des critères

La validation des cartes thématiques a été effectuée par le calcul de l'incertitude sur les moyennes des indicateurs (H. PINATIBI, 2015, p. 113 ; M. J. MANGOUA, 2019, p. 62, et K. KONÉ, 2020, p. 71). Cette incertitude a été évaluée à partir de l'équation (11) suivante :

$$\Delta\overline{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad \text{(Equation 11)}$$

Avec $\Delta\overline{X}$: l'incertitude sur la moyenne de l'indicateur ;σ : l'écart-type de l'indicateur et m : nombre de critères. La validation de la carte de zones potentielles de recharge été effectuée par la détermination du facteur d'expansion K. Ce facteur est alors calculé afin de déterminer le niveau de confiance. L'expression de ce facteur est donnée par l'équation (12) suivante :

$$K = \frac{|E - \bar{X}|}{\sigma}$$ (Equation 12)

Avec K : facteur d'expansion ; E : la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de la statistique de l'indicateur ; σ : l'écart-type de l'indicateur et $\bar{X}$: l'incertitude sur la moyenne de l'indicateur. Si K=1 alors, le niveau de confiance (NC) est 68%. Si K=2 alors, le niveau de confiance (NC) est 95%. Si K=3 alors, le niveau de confiance (NC) est 99%.

3 RESULTATS

3.1. Cartographie des facteurs de recharge de la nappe phréatique dans la zone d'étude

Occupation du sol

La carte 2 met en évidence l'ensemble des types d'occupation du sol dans la région de Gbêkê avec une précision globale de 97,97%. Elle permet de distinguer une inégale répartition de cinq (5) types d'occupation qui sont la forêt, les savanes, le plan d'eau, les cultures/jachères et les habitats/sols nus. Les savanes ont une forte colonisation avec superficie de 4724 Km² soit 51,7% du territoire régional. La forêt s'étend sur une superficie de 2125 Km² soit environ ¼ de la surface régionale. Le plan d'eau n'occupe que 2% de la surface régionale ou 186 Km² de superficie. Les cultures et les jachères exploitent une superficie de 1885 Km² qui représente 1/5 ou 20,3% du territoire régional. Les habitats et sols nus ont une exploitation de 215 Km² soit seulement 2,4% de la région.

Type de sol (S)

La carte 3 montre qu'il existe les quatre (3) groupes pédologiques dans la région de Gbêkê avec des apparitions de cuirasses et sols lithiques. Ce sont les sols ferrallitiques, bruns eutrophes et hydromorphes à gley. La région est essentiellement recouverte de sols ferrallitiques. La capacité d'infiltration est généralement liée aux propriétés physiques des sols (K. T. S. U. YEBOUE, 2016, p. 64). Ainsi, les sols ferrallitiques moyennement désaturés ont une capacité moyenne d'infiltration de l'eau. Les sols bruns eutrophes tropicaux sont concentrés dans l'Est avec des petits aperçus dans l'Ouest. Ils ont une capacité d'infiltration faible à cause de la limitation de l'hydromorphie. Les sols hydromorphes à gley sont localisés le long des affluents des fleuves Bandama et N'Zi. Ces sols sont caractérisés par un excès d'eau suite à un engorgement temporaire de surface. Le processus d'infiltration est inexistence compte tenu de la présence et de l'excès d'eau. Les cuirasses et les sols lithiques sont causés par l'induration des sols remaniés et des sols bruns. La capacité d'infiltration de ces sols indurés est très faible.

Pente (P)

La carte 4 met en évidence cinq (5) classes de pente à l'échelle de la région : les pentes très faibles, les pentes faibles, les pentes moyennes, les pentes fortes et les pentes très fortes. Les pentes très faibles ou plates oscillent entre 0 et 3,6%. Elles sont présentes sur toute l'étendue du territoire. Elles contribuent très fortement à l'infiltration. Les pentes faibles ou vallonnées dont les inclinaisons sont entre 3,7% et 6,8 %; sont majoritaires à l'échelle régionale. La particularité des vallonnées est qu'elles ont une capacité d'infiltration élevée. Les pentes moyennes ou les roulantes varient de 6,9 à 12%. Elles favorisent moyennement l'infiltration. Les pentes fortes ou peu raides ont des inclinaisons comprises entre 13 et 23%. Elles ont tendance à réduire l'infiltration en favorisant le ruissellement. Les pentes très fortes ou raides sont entre 24 et 76%. Elles sont minoritaires dans la région. Elles sont situées dans la partie Nord-Est de la région. Ce sont des pentes raides avec une aptitude hydrodynamique très faibles.

Lithologie (L)

La carte 5 montre l'aperçu géologique de la région de Gbêkê. A travers cette carte, les formations géologiques datent respectivement d'archéen, du précambrien moyen ou du birrimien et du protérozoïque inférieur. Les formations archéennes sont des roches plutoniques libériennes notamment les migmatites. Les formations du précambrien moyen sont des roches métamorphiques et de roches volcano-sédimanetaires. Les formations métamorphiques sont les roches métamorphiques schisteuses. Elles ont une capacité d'infiltration moyenne. Les formations volcano-sédimentaires sont composées de métasédiments tels que les roches indifférenciées et les métavulcanites notamment les rhyolites, les dacites, les kératophyres, les andésites, les spilites, les basaltes et les amphibolites. Ces formations ont un degré d'infiltration élevé. Les formations protérozoïques sont les roches granitiques. Ces formations sont majoritairement présentes dans la région. Ce sont des roches plutoniques orogéniques et des granitoïdes discordants et concordants. Leur capacité d'infiltration est moins élevée.

Densité de drainage (Dd)

La carte 7 montre la densité de drainage régionale selon cinq (5) classes. Les zones de densité de drainage élevées sont les tributaires du fleuve Bandama qui est le principal fleuve de la région. Ces zones sont localisées dans les extrêmes Ouest et Est précisément dans les périphéries de Béoumi, de Mamini et de Bounda. Il y' a en également dans le Sud-Est dans le département de Sakassou. Ce paysage est caractérisé par son imperméabilité liée à sa forte densité de drainage. Par conséquent, la capacité d'infiltration y est faible. Les zones de densité de drainage moyenne sont localisées dans la quasi-totalité de la zone étude. La particularité hydrodynamique de

ces zones est la modération de l'infiltration. Les zones de faibles densités de drainage sont les plus représentées de la région. Le faible drainage de ces zones favorise l'infiltration.

Infiltration efficace (Ie)

La figure 7 est relative à la répartition de l'infiltration efficace à l'échelle régionale. A travers cette carte, les localités de Botro et Béoumi ainsi que leurs espaces périphériques sont des espaces de fortes infiltrations. Elles enregistrent en moyenne 579,4 mm par an avec un maxima qui peut atteindre 637,89 mm et un minima de 521 mm. Par contre, les espaces de faibles infiltrations sont les localités de Bouaké et de Sakassou ainsi que leurs espaces environnants. Ces espaces enregistrent en moyenne 288 mm d'eau infiltrée par an. Le maxima de l'infiltration est estimé à 302 mm et le minima peut être de 274 mm au cours d'une année.

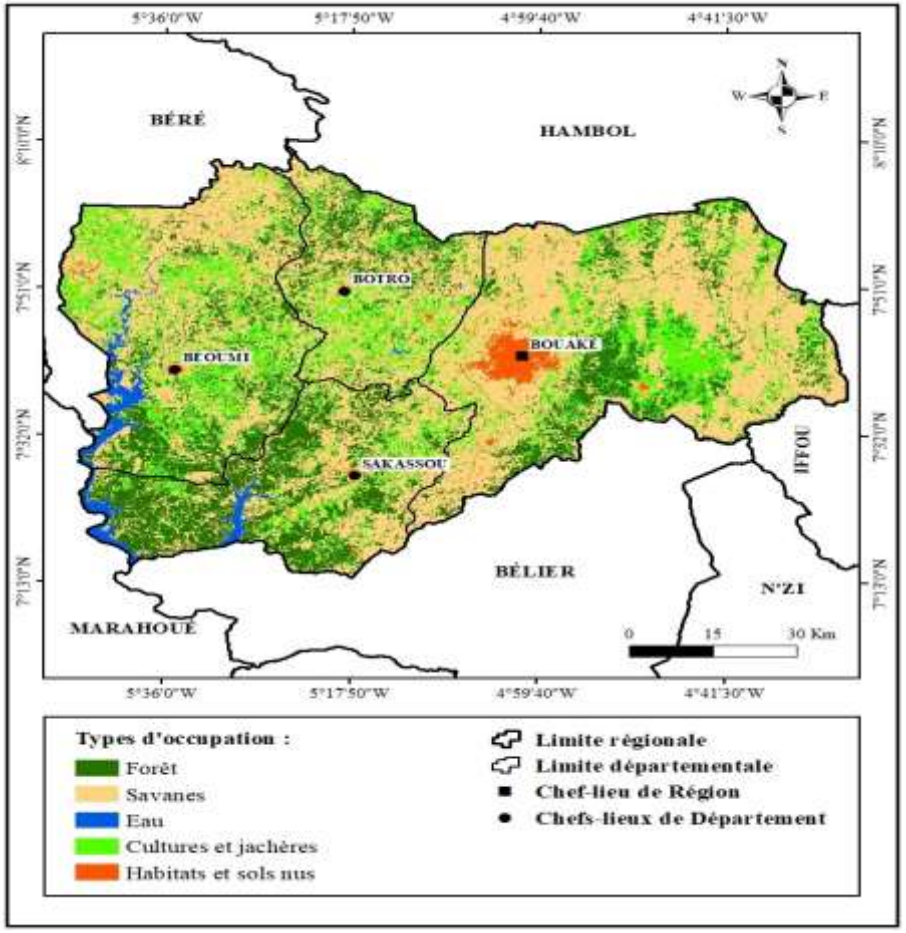


Figure 3 : Occupation du sol dans la région de Gbêkê

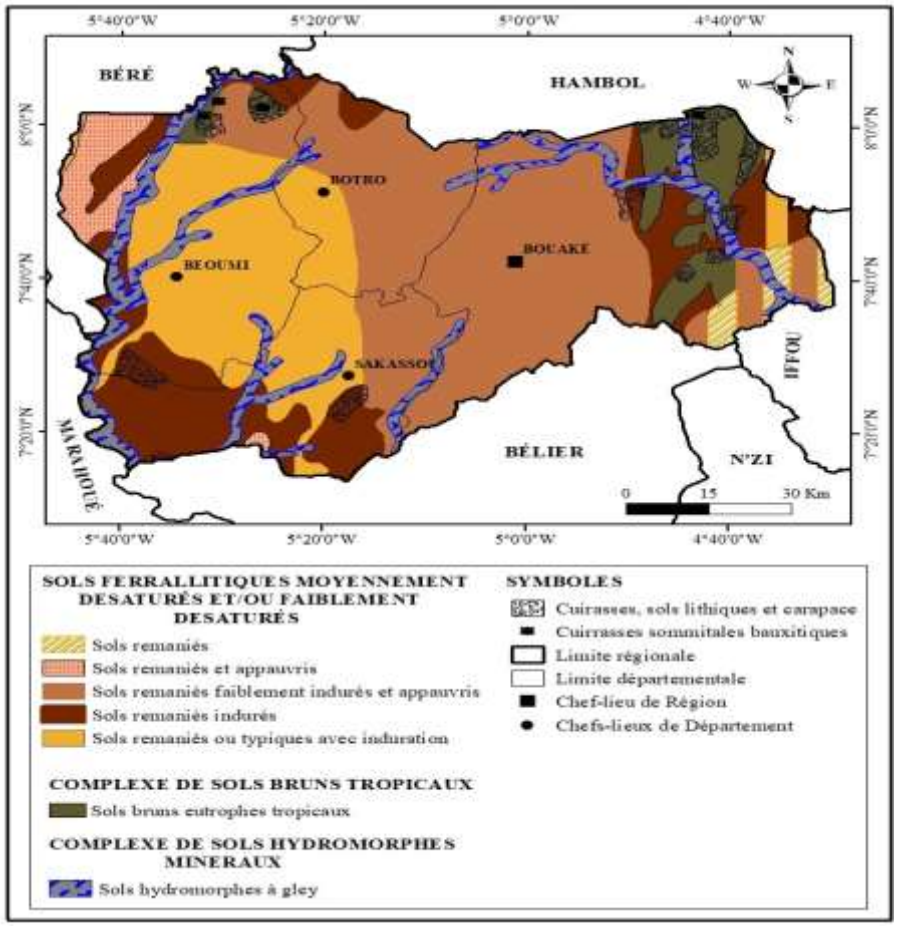


Figure 4 : Groupes de sol dans la région de Bouaké

Sources : CNTIG, 2017 ; LANDSAT, 2020 ; A. PERRAUD, 1971 et réalisation : Y. SAMAKÉ, 2024

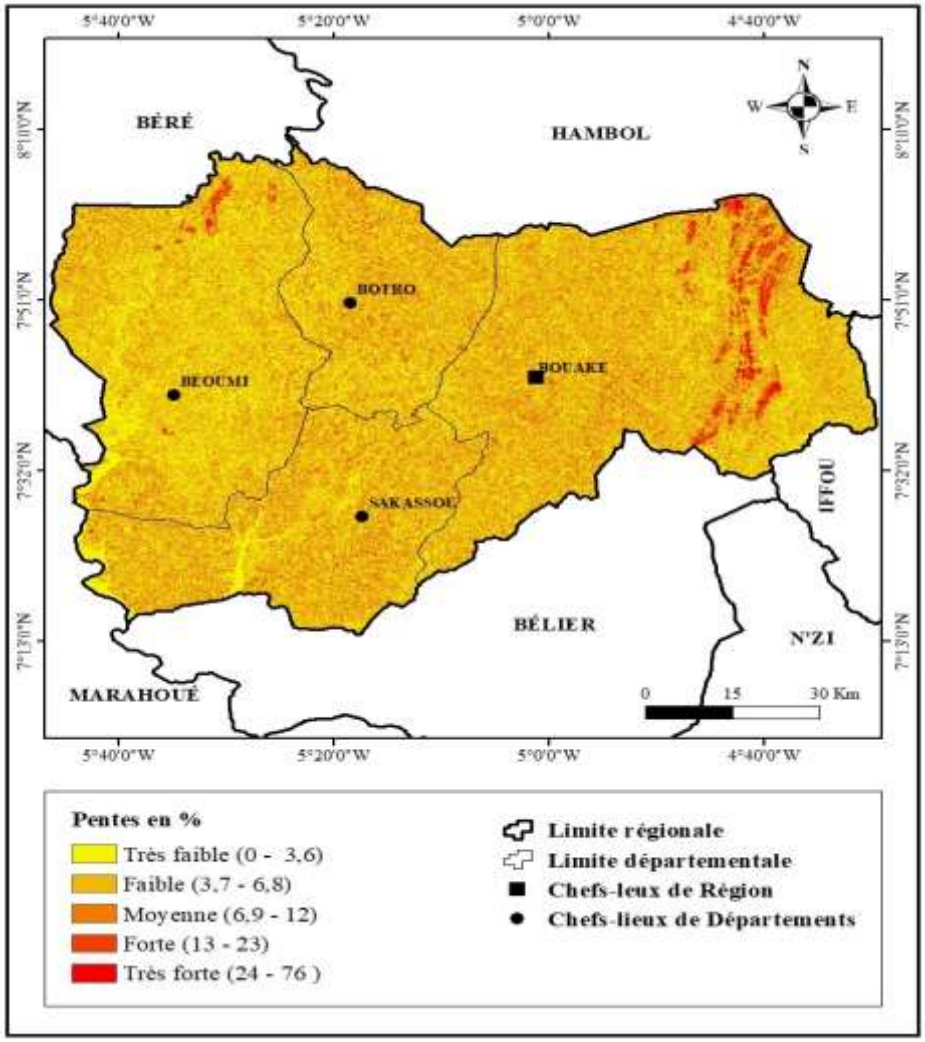


Figure 5 : Répartition des pentes dans la région de Gbêkê

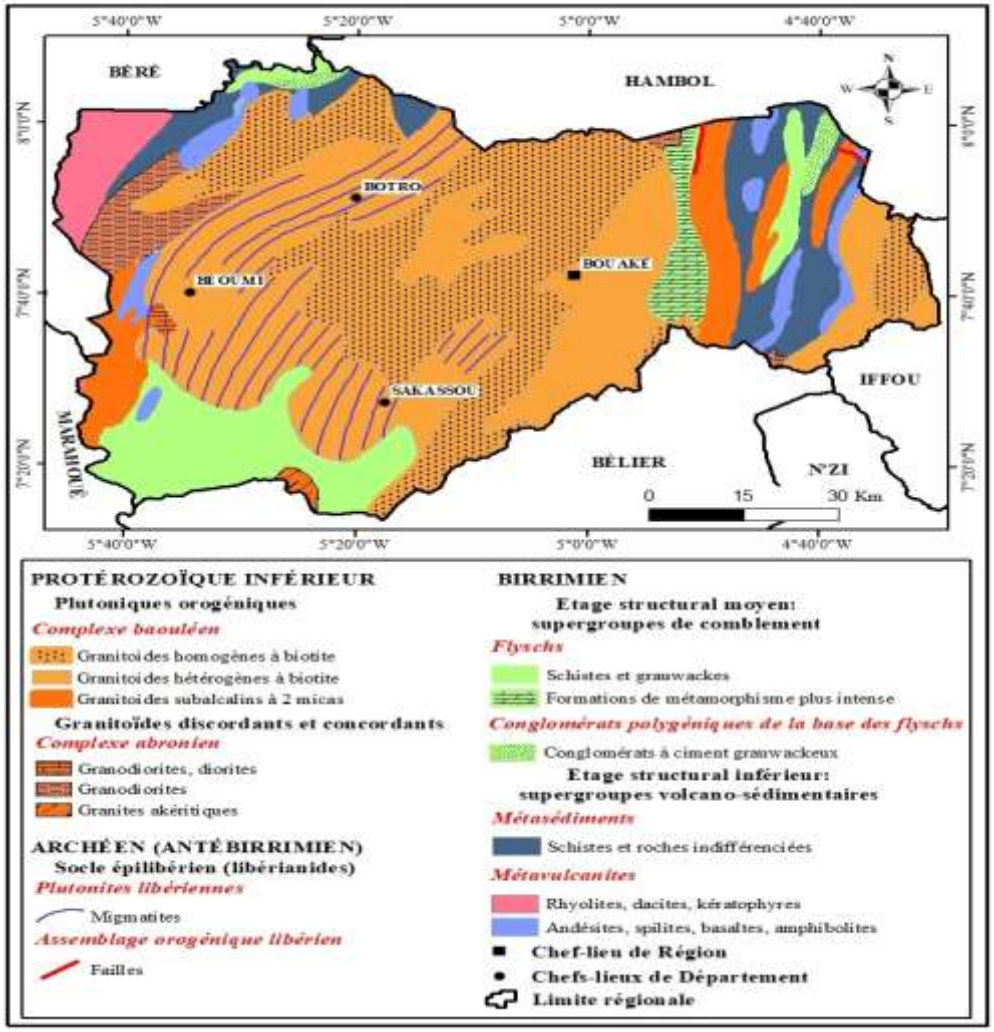


Figure 6 : Aperçu géologique de la région de Bouaké

Sources : CNTIG, 2017 ; STRM-MTN, 2020 ; B. TAGINI, 1972 et **réalisation :** Y. SAMAKÉ, 2024

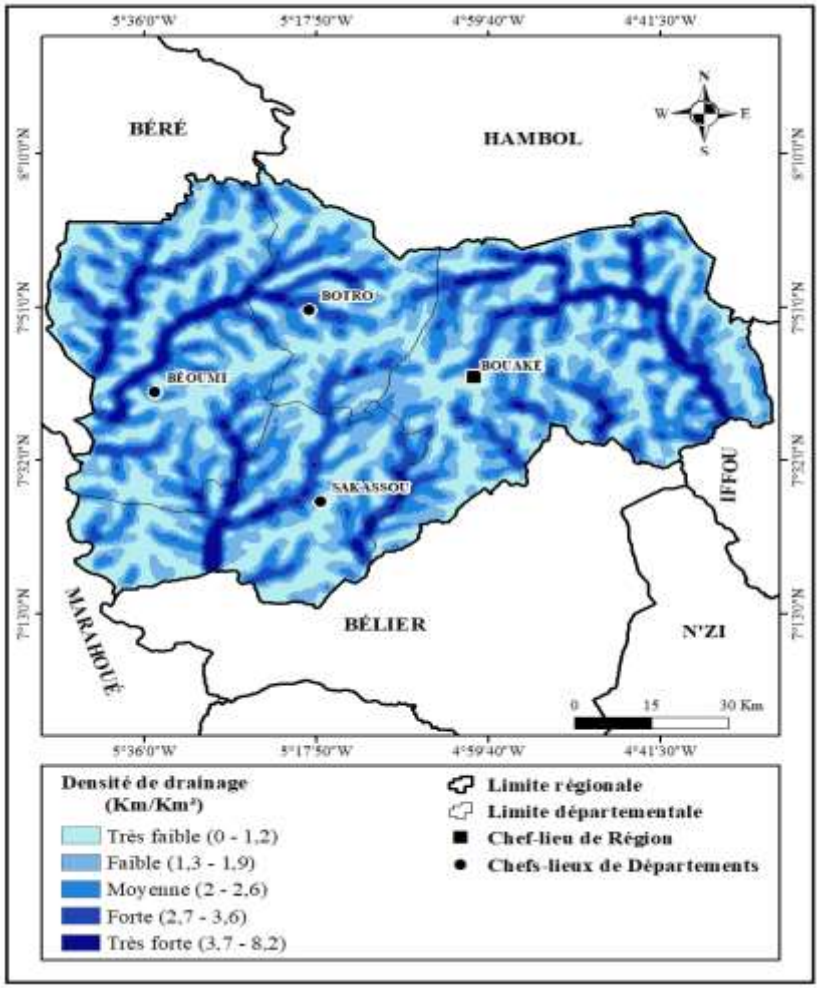


Figure 7 : Répartition la densité de drainage dans la région de Gbêkê

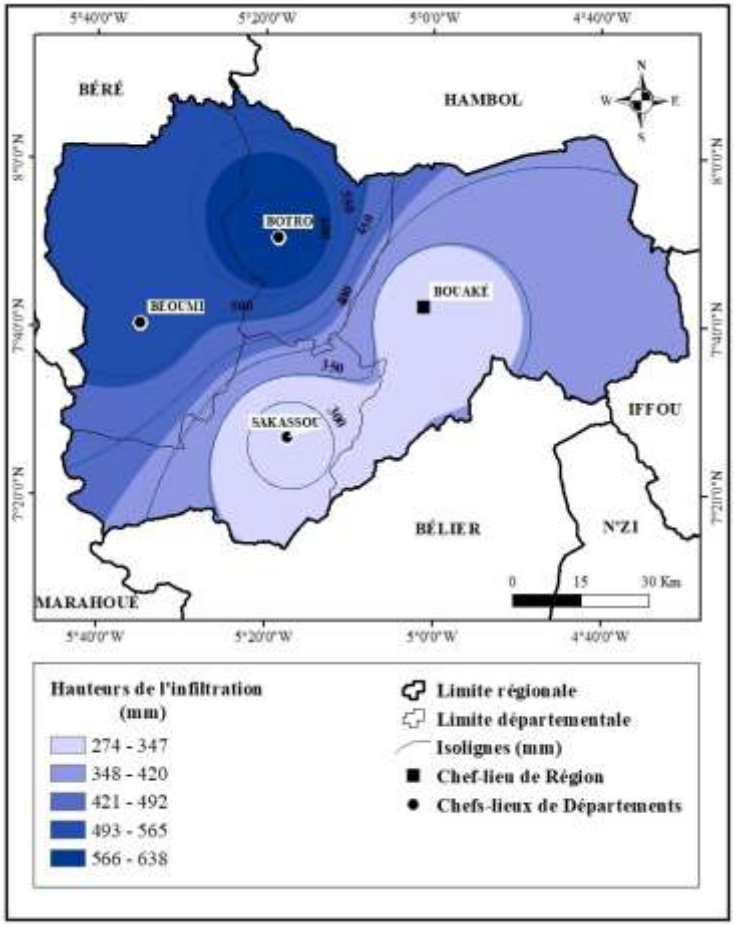


Figure 8 : Répartition de l'infiltration dans la région de Gbêkê

Sources : CNTIG, 2017 ; STRM-MTN, 2020 ; données climatiques, 2021 et **réalisation :** Y. SAMAKÉ, 2024

3.2. Analyse de la carte des zones potentielles de recharge de la nappe phréatique

Les degrés de recharge de la nappe sont au nombre de cinq (5). Ils s'expriment entre très faible et très fort (carte 8). Le taux d'occupation de chacun de ces degrés est illustré par le diagramme circulaire de la figure 9. Les zones potentielles de très faible recharge occupent une superficie de 231,56 Km² soit seulement 2,53% de la superficie régionale. Elles sont localisées dans l'extrême Ouest et dans le Sud de la région respectivement dans les départements de Béoumi et de Sakassou aussi dans l'espace périurbain de Bouaké. Le drainage y est accentué. En général, elles sont situées le long des principaux cours d'eau notamment le fleuve Bandama caractérisé par des sols hydromorphes qui ont une aptitude hydrodynamique très faible. Elles sont favorables au ruissellement au détriment de l'infiltration.

Les zones potentielles de faible recharge sont fortement concentrées dans le centre concrètement dans la ville de Bouaké et son espace périurbain. Elles sont également dans la partie Orientale précisément dans le département de Bouaké et à l'extrême Nord-Est dans le département de Béoumi. Elles s'étendent sur une superficie de 998,03 Km² ou 10,92% de la superficie de l'ensemble. Ces zones s'expliquent par la densité de l'occupation du sol par la croissance urbaine et le développement des activités économiques. L'aménagement urbain entraîne l'imperméabilisation et la mise à nu des sols qui constituent des facteurs défavorables à l'infiltration. En outre, les sols sont relativement moins perméables avec des pentes relativement fortes.

Les zones potentielles de moyenne recharge occupent 21,33% du territoire régional soit une superficie 1948,31 Km². Elles sont dispersées dans la région. Les parties Sud-Ouest et le centre sont moins concernés. Ces zones de raretés comprennent les départements de Sakassou et de Bouaké. Ces zones sont marquées par la faiblesse de la pente et de la dominance des formations géologiques ayant une aptitude hydraulique moyenne. En effet, l'ensemble de la région de Gbêkê est caractérisé par une topographie roulante avec des valeurs comprises entre 8 et 15%. Ce type topographique a une potentialité de recharge modérée. D'autre part, la lithostratigraphie des formations géologiques sous-jacentes dans l'espace régional est composée de sables grossiers qui alternent usuellement avec les sables fins et argileux. Cette alternance fait la modération de la perméabilité de ces composantes géologiques.

Les zones potentielles de forte et de très forte recharge sont concentrées dans le Sud-Ouest dans le département de Sakassou. Elles sont aussi dans les parties Nord-Ouest et sont exactement dans les départements de Béoumi et Bouaké. Ces zones occupent 65,21% de la surface régionale. Leur capacité de recharge se justifie par la dominance des pentes plates et des vallonnées dont les valeurs oscillent entre 2 et 7%. En effet, les pentes faibles constituent des atouts favorables à la recharge de la nappe souterraine. A cela, il faut ajouter la dominance de sables grossiers. Ce type pédologique a une

porosité élevée et permet l'alimentation de l'aquifère. En plus, l'occupation du sol dans ces zones est dominée par de la végétation forestière. Cette couverture végétale est favorable à l'infiltration au détriment du ruissellement (Figure 8).

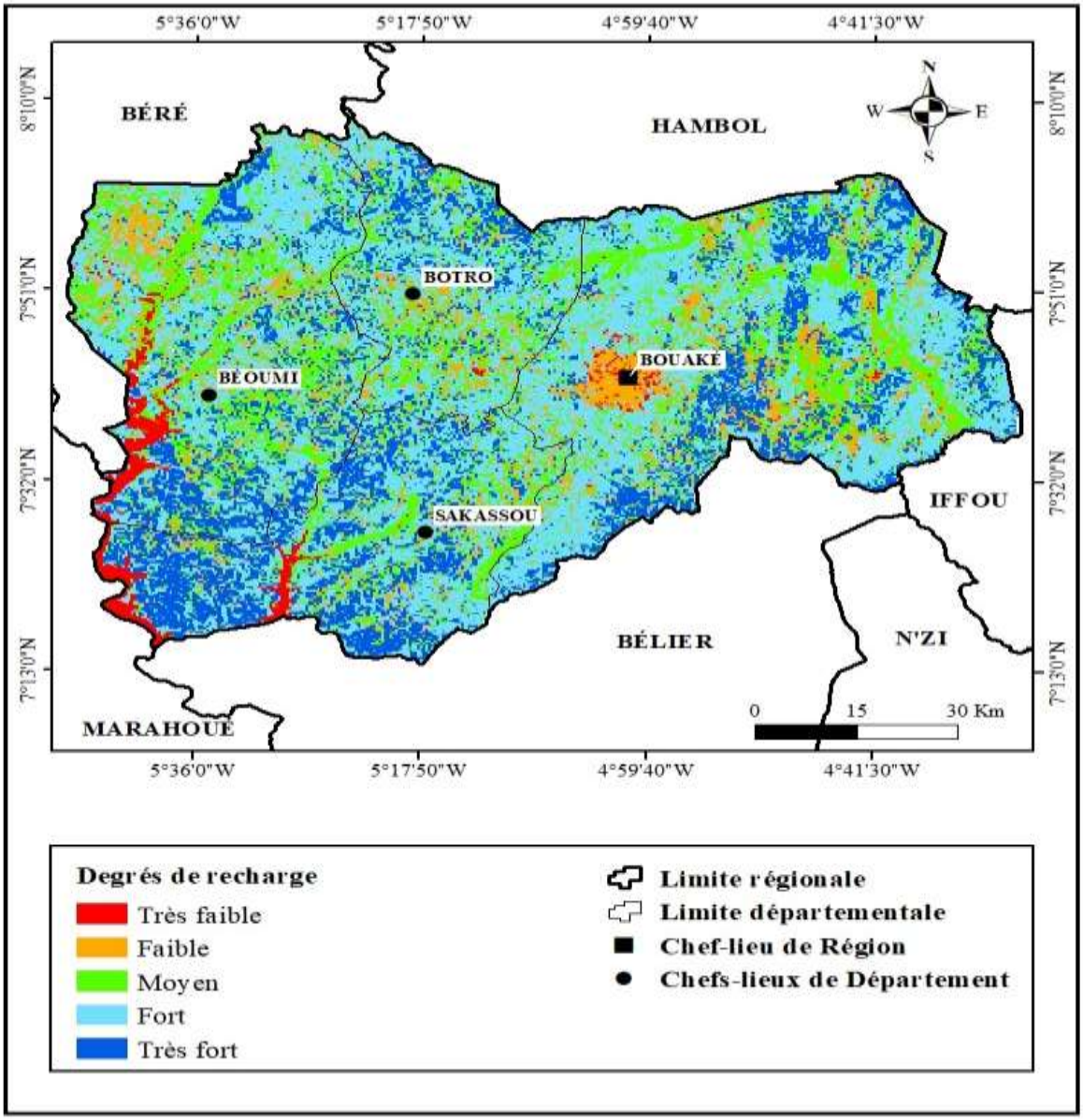
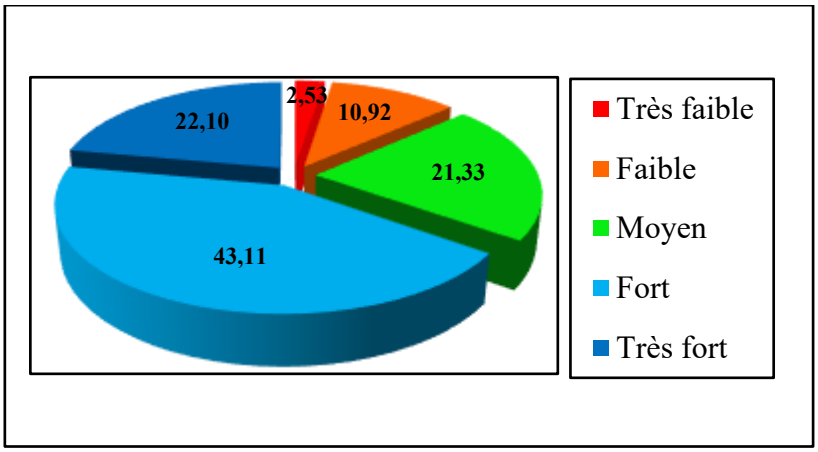


Figure 1 : Répartition des classes de zones potentielles de recharge de l'aquifère

Sources : CNTIG, 2017 ; Images satellitaires, 2020 et **réalisation** : Y. SAMAKÉ, 2024



Source : Traitement de données, 2023

Figure 9 : Proportion du potentiel de recharge des aquifères de la zone d'étude

3.3. Validation des cartes relatives à la productivité

La validation de la carte de zones potentielles de recharge a été réalisée par l'analyse statistique. Les résultats de cette analyse sont consignés dans le tableau 7. A travers ce tableau, la carte des zones potentielles de recharge s'est montrée fiable à un niveau confiance de 95%.

Tableau VII : Statistiques de la carte de zones potentielles de recharge

Variables	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	m	$\Delta\vec{X}$	K	NC (%)
Zones potentielles de recharge	1,87	20	10,1	7,3	5	3,27	2	95

Source : Traitement de données, 2023

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude est de cartographier les zones potentielles à forte productivité hydraulique en milieu rural de Gbêkè par télédétection et SIG. La carte des zones potentielles de recharge établie a permis d'analyser les degrés d'infiltration d'eaux souterraines à l'échelle régionale. Ces degrés sont constitués des plages de très faible, faible, moyen, fort et très fort. Ils sont similaires à ceux obtenus par G. E. AKE et *al.* (2018, pp. 138-140) à l'échelle de la nappe de Bonoua dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Ils ont été aussi obtenus par E. J. DJEMIN et *al.* (2022, pp. 75-77) même si ces derniers ont étudié la recharge d'eau dans le bassin sédimentaire ivoirien notamment la nappe du District d'Abidjan. L'identification des zones potentielles de recharge de la nappe phréatique dans la région de Gbêkê a été réalisée à l'aide de la télédétection et du SIG. L'occupation du sol, le type de sol, la pente ou la topographie, la densité de drainage et la couche lithologique ont constitué les principaux facteurs qui ont fait

l'objet de l'analyse. La télédétection a permis d'obtenir plusieurs facteurs qui influencent la recharge sous forme cartographique. Cependant, la diversité de données a nécessité leur intégration dans un SIG. Ainsi, la télédétection et le SIG se sont montrées efficaces dans l'identification des zones d'infiltration d'eaux souterraines (A. E. ASSEMIAN, 2014, 208p ; S. OULARE, 2017, pp. 192-217 ; K. KONE, 2022, 399p). Cette approche a aussi l'avantage d'avoir les coûts faibles pour les études portant sur de vastes superficies allant de plusieurs centaines de Km² à quelques milliers de Km², comparativement aux méthodes expérimentales (méthodes isotopiques, hydrochimiques, hydrauliques, etc.) dont les coûts sont très élevés pour des surfaces limitées (S. OULARE, 2017, p. 210). En dépit de ces avantages, cette technique présente des faiblesses dans l'identification des zones d'infiltration d'eau. Ces faiblesses peuvent être liées à la qualité de l'image en milieu tropical à cause des conditions atmosphériques (T. J. H. COULIBALY, 2009, pp. 39-40 et M. KOITA, 2010, p. 2). S. NAKOLENDOUSSE (1991, p. 27) et V. M. SOROKOBY (2013, p. 27) suggèrent que cette technique soit associée à d'autres méthodes de prospection pour plus de précision. Par ailleurs, le choix et le jugement des facteurs (les critères) constituent des entraves dans l'analyse multicritère. En effet, avec la méthode d'analyse multicritère de SAATY (1977), le choix des paramètres n'excède pas sept (7) niveaux de hiérarchisation. Ainsi, le choix des cinq (5) paramètres retenus dans le cadre de cette étude s'est fait selon leurs influences dans la recharge de la nappe. Pourtant d'autres facteurs tels que la pluviométrie, la température et la conductivité hydraulique pourraient influencer la recharge. La subjectivité est l'une des difficultés dans l'application de la méthode d'analyse multicritère de SAATY (1977). Certes, la classification, la codification et la pondération des paramètres se sont opérées selon l'analyse relationnelle entre les paramètres. Mais les valeurs attribuées aux paramètres ont tendance à surestimer ou à sous-estimer la recharge de la nappe (G. E. AKE, 2018, p. 142). Dans ce cas, certains facteurs tels que les types de sols et les formations géologiques nécessitent des études approfondies afin d'évaluer leurs aptitudes hydrauliques.

Malgré ces limites méthodologiques, la carte de zones potentielles de recharge de la nappe dans la région de Gbêkê est fiable dans la mesure où elle est à un niveau confiance de 95%. En plus, les résultats sont conformes aux réalités du terrain. En perspective, il serait intéressant de prendre en compte les paramètres climatiques (la pluviométrie et la température) afin de valider la cartographie des zones de recharge et aussi de quantifier les recharges.

CONCLUSION

La carte des zones potentielles de recharge de la nappe phréatique a été élaborée à l'aide de la télédétection et du SIG. Cette carte met en évidence une inégale répartition de cinq (5) degrés d'infiltration : très faible, faible, moyen, fort et très fort. Cette carte a été validée avec un niveau de confiance de 95%. Les zones potentielles de forte

recharge occupent 65,21% de la surface régionale. Elles sont concentrées dans le Sud-Ouest dans le département de Sakassou. Elles sont aussi dans les parties Nord-Ouest et Est exactement dans les départements de Béoumi et Bouaké. La carte de zones potentielles de recharge élaborée peut être utile dans l'aménagement hydraulique souterrain à l'échelle de la région.

Références bibliographiques

ABOU Babaye Maman Sani, 2012, *Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptato-Niger)*, Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 265p.

AGENCE JAPONAISE DE COOPERATION INTERNATIONALE (JICA), 2017, *Le projet de développement des ressources humaines pour le renforcement de l'administration locale dans les zones Centre et Nord de la Côte d'Ivoire,* Rapport de projet, Abidjan, 286p.

AHOUSSI Kouassi Enerst, YOUAN TA Marc, LOKO Solange, ADJA Miessan Germain, LASM Théophile et JOURDA Jean Patrice, 2012, « Etude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléo-protérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : cas de la région de Bondoukou » in *Afrique science,* 08(3) (2012) 51-68, ISSN 1813-548X, pp. 51-68.

AKÉ Gabriel Etienne, KOUAME Kan Jean, KOFFI Affoué Bénédicte et JOURDA Jean Patrice, 2018, « Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) » in *Revue des Sciences de l'Eau 31(2),* ISSN : 1718-8598, pp. 129-144.

ASSEMIAN Assiè Emile, 2014, *Etude des potentialités en eau souterraine du département de Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) par télédétection et SIG*, Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 208p.

COULIBALY Jean Honoré Talnan, 2009, *Répartition spatiale, gestion et exploitation des eaux souterraines : cas du département du Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire*, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, France, 142 p.

DIBI Brou, DOUMOUYA Inza, GOULA BI Tié Albert, SAVANE Issiaka, et BIEMI Jean, 2004, « Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud Est de la Côte d'Ivoire) » in *Sud sciences et technologies,* N°13, Abidjan, Côte d'Ivoire, pp. 22-31.

DJÉMIN Édoukou Jacques, ANONGBA Braphond Vincent Rodrigue Benjamin, N'Guessan Yao Germain, SORO Sandona Issa, ADJA Miessan Germain et JOURDA Jean Patrice, 2022, « Contribution de la télédétection et d'un SIG à la cartographie de la dynamique spatio-temporelle des zones potentielles de recharge des nappes du District d'Abidjan (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). » in

European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X / 1450-202X, Vol. 161, N°1, pp. 63-80.

KAWALEC Aleksander, 1980, « Les zones agro-écologiques de la république Centrafricaines : méthodologie et limites des zones. » in *Bulletin du service des sols*, ISN : 4825, Bangui, 25 p.

KOITA Mamadou., 2010, *Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire)*, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier (France), 235p.

KONE Karnon, 2022, *Etude par télédétection et SIG de la disponibilité en eau potable du socle cristallin de la région de la Bagoué (Côte d'Ivoire),* Thèse de Doctorat, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire, 399p.

MANGOUA OiMangoua Jules, YAO AffouéBerthé, DOUAGUI Gountôh Aristide, KOUASSI Kouamé Auguste, GOULA BI Tié Albert, BIEMI Jean, 2019, « Evaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissurés dans le bassin versant du Bandama (Côte d'ivoire) », in : *Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°37,* pp 53-74.

MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE DE LA CÔTE D'IVOIRE, 2020, *projet de renforcement de l'Alimentation en eau potable de la ville de Bouaké à partir du lac Kossou,* Bouaké (Côte d'Ivoire), 3 p.

MOUELHI Safouane, 2003, *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier,* Thèse de Doctorat, Ecole Normale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Paris (France), 323 p.

NAKOLENDOUSSE Samuel, 1991, *Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso : géologie, géophysique et télédétection,* Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 256 p.

NOURANI Ahmed, KACI Ferhat et BOUAZIZ Mohamed, 2016, « Analyse hiérarchique multicritères pour évaluer des élévateurs à nacelles intervenant au sommet de palmier dattier. » in *Revue Agriculture,* Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algérie, pp. 4-11.

NOUAYTI Nordine, KHATTACH Driss et HILALI Mohamed, 2017, « Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : apport de la télédétection et du système d'information géographique. » in *Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre,* N°39, e-ISSN : 2458-7184, pp. 45-57.

OULARÉ Sekouba, ADON Gnangui Christian, AKPA Lucette You, SALEY Mahaman Bachir, KOUAME Koffi Fernand et THERRIEN René, 2017, « Identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du bassin Versant du N'Zo (Ouest de la Côte d'Ivoire) : contribution du SIG et de la

télédétection » in *European Scientific Journal,* Vol. 13, ISSN : 1857 – 7881, pp. 192 – 217.

PERRAUD Alain, 1971, « Les sols » in *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire,* Mémoire ORSTOM, N° 50, Paris, pp. 269-391.

PINATIBI Hyann, COULIBALY Naga, COULIBALY Talnan Jean Honoré et SAVANÉ Issiaka, 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) » in *European Scientific Journal,* N° 35 ISSN : 1857-7881, e-ISSN 1857-7431, pp. 106-122.

RAMOS Anabela, CUNHA Lucio et CUNHA Pedro, 2014, « Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz Nazaré. » in *Geo Eco Trop,* N°38, pp. 33 44.

SAATY Thomas, 2004, « Decision making–the analytic hierarchy and network process (AHP/ANP) » in *Journal of Science and Systems Engineering,* Vol. 13, N°1, ISSN 1004-3756/04/1301/1 CN11-2983/N, pp. 1-35.

SOROKOBY Vano Mathunaise, 2013, *Etude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (sud-ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique,* Thèse de doctorat, CURAT, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 219 p.

TAGINI Bernard, 1972, Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire : essai de géotectonique régionale, in *Bulletin de la Direction des mines et de la géologie de Côte d'Ivoire,* N°5, SODEMI, 302 p.

YEBOUE Konan Thiéry Saint Urbain, 2016, *Problématique de la riziculture dans la région de Gbêkê,* Thèse de Doctorat, Université Alassane Ouattara, Bouaké, 335 p.

YOUAN TA Marc, YAO Kouadio Assemien François, BAKA Derving, DE LASM Zéphir Omer, LASM Théophile, ADJA Miessan Germain, KOUAKOU Suzane Ourapa, ONETIE Oscar Zahibo, JOURDA Jean Patrice et BIEMI Jean, 2015, « Cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages à gros débits en milieu fissuré par analyse multicritère : cas du département d'Oumé (centre-ouest de la Côte d'Ivoire) » in *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N°23, pp. 155-181