

RESEARCH ARTICLE

**Recharge des eaux souterraines au
Cameroun : approche geospatiale
multicritere**

AUTHORS

Didier Jean B. Haman

Fyetoh W. Fantong

G. Ombolo Auguste Ewodo Mboudou

Gabriel Messi

Approche décisionnelle géospatiale et multicritère dans l'identification des zones potentielles de recharge des eaux souterraines : cas du bassin versant du Mayo Bocki au Nord Cameroun.

Haman Didier Jean B¹., Ewodo Mboudou G². Ombolo Auguste², Fantong Fyetch W³., et Messi Gabriel²

¹Unité de Formation Doctorale des Sciences Fondamentales, Département de Sciences de la Terre / Faculté des Sciences de l'Université de Maroua, Cameroun

²Département d'Hydraulique et Maitrise des Eaux de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Université de Maroua, Cameroun,

³Institut de Recherches Géologiques et Minière/ Ministère de la Recherche Scientifique et de l'Innovation, Cameroun

Auteur correspondant : Haman Didier Jean Blaise (didierhaman@yahoo.fr)

RESUME

La présente étude a été effectuée pour déterminer les zones potentielles de recharge des eaux souterraines. Pour ce faire, la démarche méthodologique était basée sur l'analyse multicritère associée aux techniques géospatiales. Les données utilisées étaient entre autres les images satellitaires, les fonds cartographiques, les données pluviométriques et les niveaux statiques. Ces données ont permis d'exprimer sous forme de carte thématique les facteurs régissant la recharge (pente, drainage, lithologie, fracturation, sol, pluviométrie et occupation du sol). L'analyse de sensibilité par suppression d'un paramètre a permis d'établir l'ordre d'influence suivant : Lit > Sol > AACH > Df > Pl > Pe > Dd > OS. Le croisement de tous ces paramètres après pondération a conduit à l'élaboration de la carte qui montre que les zones à fort potentiel occupent 3 % de la zone d'étude pendant que les zones de faible à faible potentialité sont de l'ordre de 58 % dans le bassin. Les zones à potentialité moyenne quant à elles représentent 39%. Ce support cartographique constitue indéniablement un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de l'eau.

Mots clés : Analyse Multicritère, Zones potentielles de recharge, Mayo Bocki

ABSTRACT

This study was carried out to determine potential groundwater recharge areas. To do this, the methodological approach was based on multi-criteria analysis associated with geospatial techniques. The data used were, among others, satellite images, base maps, rainfall data and static levels. These data made it possible to express in the form of a thematic map the factors governing the recharge (slope, drainage, lithology, fracturing, soil, rainfall and land use). The sensitivity analysis by deletion of a parameter made it possible to establish the following order of influence: Lit > Sol > AACH > Df > Pl

Received: 30/04/2022

Accepted: 15/05/2022

DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/jcas.v17i2.5>

© The Authors. This work is published under the Creative Commons Attribution 4.0 International Licence.

> Pe > Dd > OS. The crossing of all these parameters after weighting led to the development of the map of potential recharge zones which revealed that the zones with high potential occupy 3% of the study zone while the zones with low to low potentiality are around 58% in the basin. Areas with average potential represent 39%. This cartographic support is undeniably a decision-making tool for water managers.

Keywords: Multi-criteria analysis, Potential recharge areas, Mayo Bocki

INTRODUCTION

Les eaux souterraines constituent une ressource d'eau privilégiée dans de nombreuses régions du monde. Elles répondent aux besoins croissants concernant l'approvisionnement des populations ainsi que dans les activités agricoles et industrielles (Cocker et al., 2020 ; Dieng et al., 2020 ; Ewodo et al., 2015). La forte sollicitation de cette ressource est aussi due au fait qu'elle est généralement de bonne qualité, moins sensible à la variabilité climatique et souvent abondante en zone sahélienne (Yonas et Tesfa, 2021 ; Viguié, 2016 ; Affoué et al., 2016). En général, les eaux souterraines contenues dans les aquifères se rechargent soit directement à partir de la pluie, soit indirectement à partir de la percolation latérale à travers le lit des cours d'eau, et/ou de façon localisée à partir des surfaces d'accumulation (Soro, 2017 ; Leduc, 2003 ; Lerner et al., 1990). Cette recharge qui constitue un élément essentiel dans le cycle hydrologique se fait préférentiellement dans des zones potentielles (Ibrahim et Moussa, 2020). La connaissance de ces dernières est d'une importance primordiale dans la protection et la préservation de la ressource. Elle permet de prévenir les risques de pollution de la nappe, et de définir les périmètres de protection des zones de captage d'eau potable (Huet, 2015 ; Mohammed, 2012 ; Abdoubabayé, 2012, Aké et al., 2010). Plusieurs approches sont utilisées pour identifier les zones favorables à la recharge. Il s'agit notamment des méthodes expérimentales basées sur la géochimie isotopique (Edmunds, 2002, Fantong et al., 2010) , le bilan de chlorure (Chantry et al., 2003), ainsi que

l'analyse des cartes piézométriques (Castany, 1998). Ces méthodes expérimentales appliquées à l'échelle locale nécessitent plus de suivis sur le terrain et sont très coûteuses (Nampak et coll., 2014). Au cours de ces dernières années, la télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques se sont montrées performantes et utilisées de plus en plus pour appréhender la variabilité spatiale de la recharge (Makonyo et Msabi, 2021 ; Biswajit et Subodh, 2019, Rajasekhar et al., 2019 ; Sing, 2018). Ces techniques spatiales ont l'avantage de couvrir des superficies de plusieurs centaines ou milliers de Km² dans un délai court et à moindre coût (Sékouba et al., 2017 ; Nouaty et al., 2017 ; Shaban et al., 2006). En plus, elles intègrent à partir d'une analyse multicritère l'essentiel des facteurs qui régissent la recharge tels que la pente de terrain, la densité de drainage, la densité de fracturation, le type de lithologie, l'occupation et le type de sol, la perméabilité des réservoirs aquifères (Mohamed et al., 2017 ; Makonyo et Msabi, 2021 ; Rajasekhar et al., 2019). Le bassin versant du Mayo Bocki (BVMB) est un grand bassin s'étendant sur près de deux milles Km², et la ressource en eau souterraine y est la plus sollicitée par les populations. Malgré l'importance qu'elle représente, sa connaissance reste fragmentaire. Les rares travaux effectués dans ce bassin (Detay ,1987 ; Djeuda ,1987) se sont appesantis sur les mesures ponctuelles de piézométrie et l'évaluation de la productivité des aquifères à partir des analyses statistiques des essais de pompage. Face aux problèmes de

surexploitation et des menaces dues aux activités humaines qui pèsent sur la qualité des eaux dans ce bassin, aucune étude spécifique n'a été réalisée sur l'évaluation qualitative et quantitative de la recharge de la nappe. C'est dans ce cadre que ce bassin a fait l'objet de détermination des zones potentielles de recharge des eaux souterraines à partir des techniques spatiales. Ceci, dans le but d'aider les gestionnaires des ressources en eau à élaborer des plans de gestion précis et une meilleure utilisation des ressources en eaux souterraines.

1- ZONE D'ETUDE

Le bassin versant du Mayo Bocki (figure 1) couvre une superficie d'environ 1680 Km². Il est situé dans la région du Nord Cameroun entre les parallèles 8° 20' et 8°50' de latitude Nord et les méridiens 13°10' et 13° 40' de longitude Est. L'ensemble de ce bassin est drainé par des cours d'eau temporaires dont les écoulements convergent vers le principal collecteur qui est le Mayo Bocki. Sur le plan géomorphologique, le bassin est caractérisé par plusieurs ensembles topographiques. Le sud de la zone d'étude est délimité par une imposante ceinture montagneuse dont les altitudes varient entre 515 et 1946 m. Au nord du bassin, s'est établit une plaine dont les altitudes oscillent entre 222 et 315 m. La zone transitoire entre les hauts sommets et les plaines se situe dans la zone centrale (315-515 m) et occupe environ les deux-tiers du bassin avec des interfluvies formés par des massifs disséminés.

Le climat qui y règne est de type soudanien à tendance humide caractérisé par deux saisons contrastées (Feumba, 2017) : une saison sèche allant de novembre à avril et une saison des pluies qui s'étend de mai à octobre. La pluviométrie moyenne annuelle estimée entre 2020 et 2021 est de l'ordre de 1100 mm, pour une température moyenne de 23°C.

La géologie de la zone d'étude est constituée de socle cristallin et cristallophyllien d'âge précambrien représenté principalement par des granites, des gneiss, des schistes et des micaschistes (Houketchang, 2010 ; Toteu et al. 2006 ; Bassahak, 1988 ; Toteu ; 1987 ; Ngako, 1986 ; Njel, 1986 ;). Sur ces formations de socle reposent par endroit des formations de couverture (Penaye, 1988 ; Dumont et al.,1985) constituées essentiellement des roches volcaniques (basalte, trachytes rhyolites dolérite,) et sédimentaires (grès, argiles, sables).

Les réserves d'eau souterraines du bassin sont contenues dans deux types d'aquifères qui sont en général superposés (Djeuda, 1987 ; Detay, 1987). Les aquifères d'altérites (superficiels) sont formés dans les matériaux argilo-sableux ou sablo-argileux et dans les arènes alors que les aquifères de socle fracturés (profonds) sont discontinus et formés principalement dans les granites, les gneiss et les schistes. La recharge des aquifères est tributaire pour l'essentiel des eaux de pluie (Djeuda, 1987).

2-MATERIEL ET METHODES

La démarche adoptée pour la cartographie des zones potentielles de recharge était basée sur une approche multicritère ponctuée principalement par l'élaboration des cartes thématiques, la pondération et l'agrégation des paramètres.

2.1 – Elaboration et analyse des cartes thématiques

La pente de terrain, la densité de drainage, la densité de fracturation, la géologie (lithologie) le type de sols, l'occupation des sols et la pluviométrie sont les différents facteurs de recharge dont les cartes ont été établies dans cette étude.

La pente de terrain est considérée comme l'un des principaux facteurs qui contrôlent directement le taux de recharge (Biswajit et Subodh, 2019).

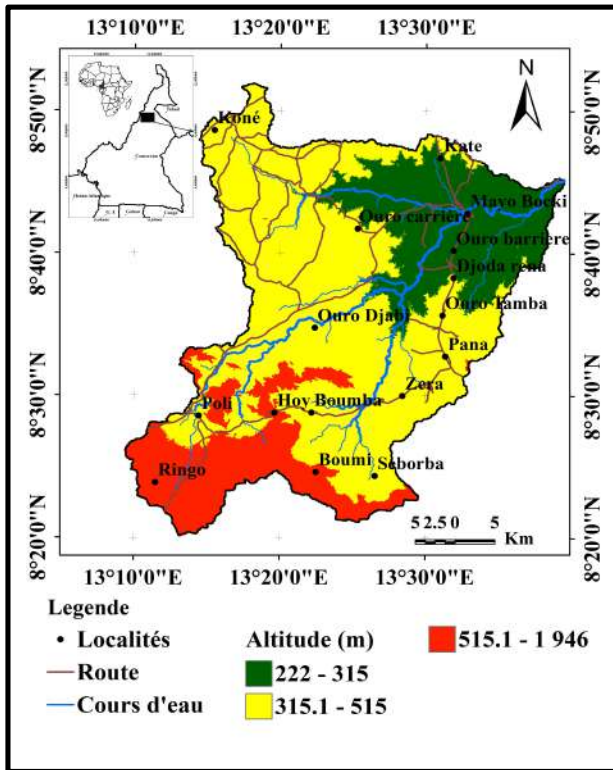


Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant du Mayo Bocké (BVMB)

Ainsi, plus la pente est forte, plus l'eau de surface circule rapidement et moins la nappe se recharge. Lorsque la pente devient faible, l'eau a tendance à stagner et l'infiltration prend le dessus sur le ruissellement (Saravanan et al., 2020 ; Abdoubabayé, 2012). La carte de pente du BVMB a été produite à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dérivant des données SRTM (30 m de résolution) grâce à la fonction « Slope » du logiciel ArcGis. Ainsi, les valeurs des angles de pente obtenues varient de 0 à 77,99° (figure 2a). Cette plage de valeurs a été catégorisée en 5 classes selon la potentialité de recharge qui sont entre autres les classes très forte (0-1,66°), forte (1,67-4,15°), moyenne (4,16-8,14°), faible (8,15-14,12°) et très faible (14,13-77,99°) couvrant respectivement 37 %, 40 %, 8 %, 4 % et 11 % de la superficie du bassin étudié.

La densité de drainage est tributaire de la géologie (structure et lithologie) et des caractéristiques topographiques du bassin versant (Ibrahim et

Moussa, 2020 ; Rajasekhar et al., 2019). C'est un facteur qui permet d'évaluer un certain potentiel de la recharge des eaux souterraines par les eaux de surface. Dans le cas du présent travail, la carte de densité de drainage (figure 2b) a été établie à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu des données SRTM (30 m de résolution) grâce à la fonction « Kernel density » du logiciel ArcGis. Il y ressort que la densité de drainage varie entre 0 à 202,7 Km/Km². Ces valeurs ont été subdivisées en 5 classes notamment : 0 – 40,54 ; 40,55 – 81,07 ; 81,08 – 121,6 ; 121,7 – 162,1 ; 162,2 – 207,7 Km/Km² et occupent respectivement 11 %, 35 %, 36 %, 16 % et 2 % de la surface du BVMB. Une forte densité de drainage implique un ruissellement important et par conséquent un faible taux de recharge de la nappe (Andualem et Demeké, 2019 ; Sékouba et al., 2017 ; Pinatibi et al., 2015).

Les cartes géologiques et pédologiques du bassin versant ont été obtenues respectivement par géoréférencement et digitalisation dans ArcGis 10.3 des cartes géologiques (Feuille NC-33-II de Poli éditée par le CRGM/IRGM) et pédologiques de Poli (Brabant et Humbel 1984) dressées à l'échelle 1/200.000. La capacité d'infiltration d'une formation géologique dépend de sa compacité, de son état d'altération et de son système de fracturation (Sékouba et al., 2017 ; Koita, 2010). Les roches très compactes entravent le processus de recharge alors que les roches dont les matériaux sont inconsolidés présentent des bonnes potentialités de recharge (Mussa et al., 2020). Il apparaît que les granitoïdes occupent 40 % de la surface du bassin (figure 3a) et influencent à un degré faible à moyenne la recharge. Cependant, les schistes et les amphibolites représentent 42% du bassin et contribuent très faiblement à la recharge des eaux souterraines. Toutefois, les formations volcaniques et sédimentaires couvrent respectivement 17% et 1% de la superficie totale

du bassin et influencent significativement la recharge des aquifères. En ce qui les formations pédologiques, les sols hydromorphes, ferrugineux,

peu évolués, fersiallitiques et minéraux bruts occupent respectivement les proportions de 46,16 % ; 14,45 % ; 37 ; 4 % ; 1,3 % ; 0,69 %.

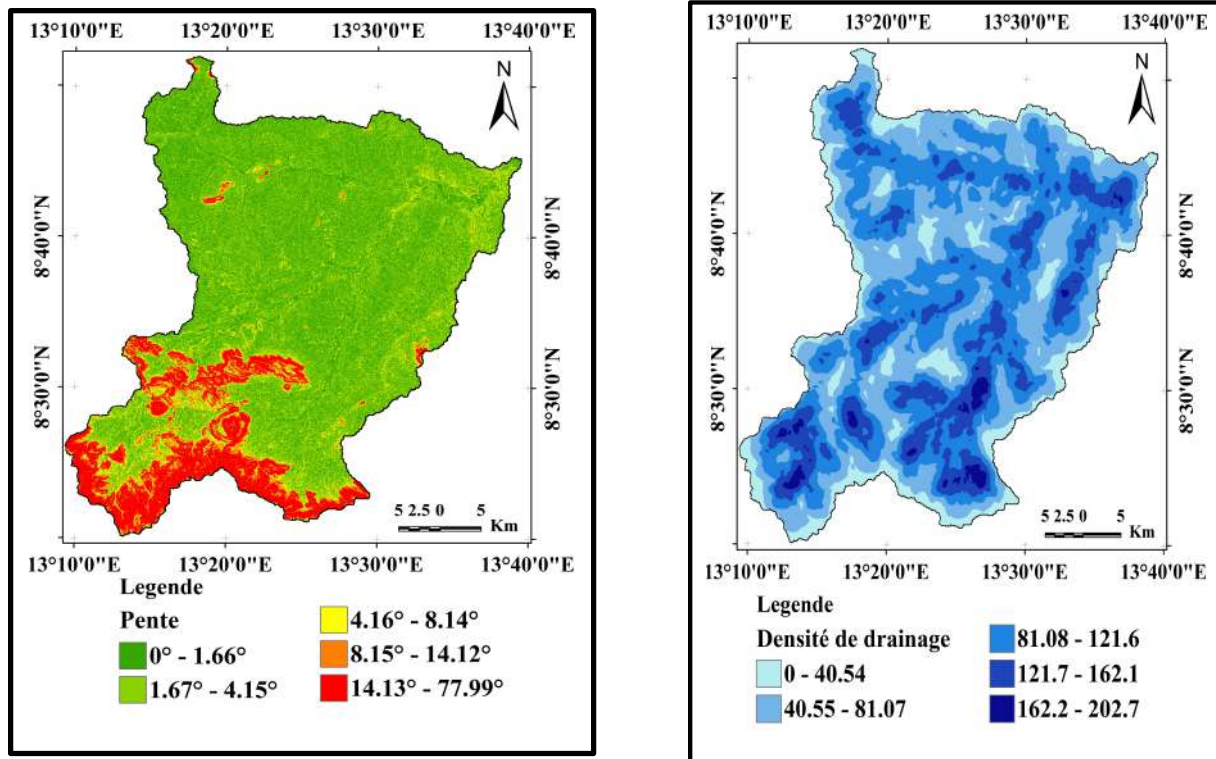


Figure 2 : Carte de pente (a) et de la densité de drainage (b) dans le BVMB

L'image satellitaire Landsat 8 OLI (Operationnal Land Imager) de la scène 185-41 acquise le 06/03/2021 sur le site officiel de Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) a permis d'élaborer les cartes de linéaments et d'occupation du sol. En ce qui concerne l'extraction linéamentaire, l'image Landsat 8 OLI a fait l'objet de plusieurs prétraitements (attachement des bandes spectrales, contraste et correction géométrique, extraction du bassin). L'image prétraitée au moyen du logiciel ENVI a ensuite subi des traitements par l'Analyse en Composante Principale (ACP) afin d'améliorer le contraste et rehausser les informations des bandes spectrales. Dans le cadre de cette étude, l'ACP sélective a été effectuée sur les bandes OLI du visibles (1,2,3,4), de l'infrarouge (5,6,7) et sur l'ensemble des sept (07) premières bandes (1,2,3,4,5,6,7) de 30 m de résolution spatiale chacune. Ces différentes combinaisons de bandes avaient pour

but d'extraire le maximum d'informations spectrales tout en évitant la redondance. Les images brutes et les néocanaux issues des combinaisons ACP ont fait l'objet des filtres directionnels de type Sobel (matrice 5X5) suivant les directions N-S, E-W, NW-SE, et NE-SW. Ces filtres ont été exportés vers le logiciel Geomatica qui à travers son module LINE a permis l'extraction automatique des linéaments. La validation de la carte linéamentaire en carte de fracturation a reposé sur la superposition des cartes linéamentaires et géologiques suivie de l'analyse des concordances des différentes structures linéaires, ainsi que la comparaison des rosaces directionnelles issue de la carte linéamentaire et celle des mesures de terrain faite par Djeuda (1987). La carte de fracturation (figure 4a) présente 2229 fractures de direction et de longueur différente. La rosace directionnelle élaborée (figure 4b) montre que les classes N00-10 (N-S), N20-

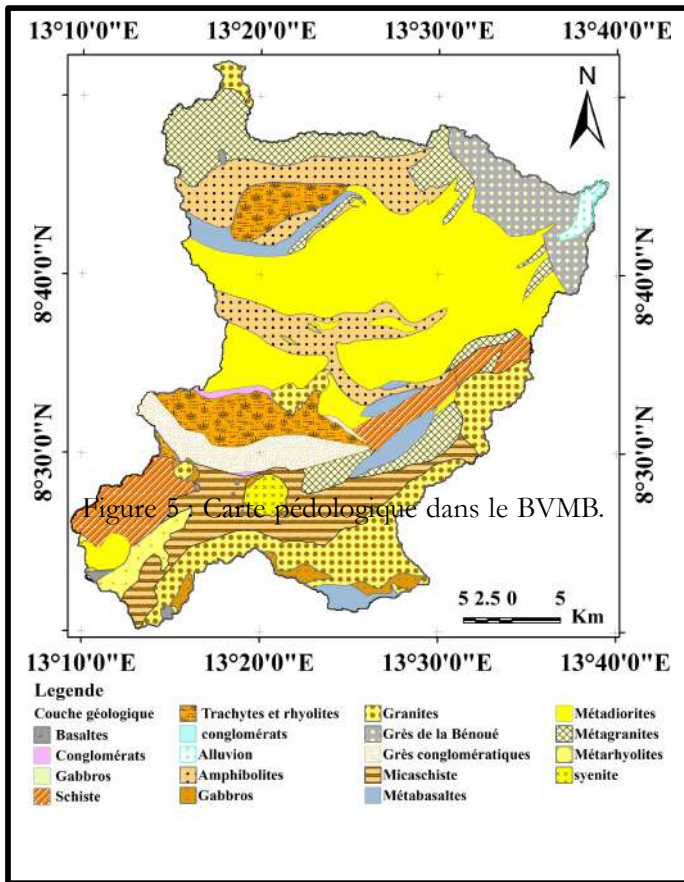
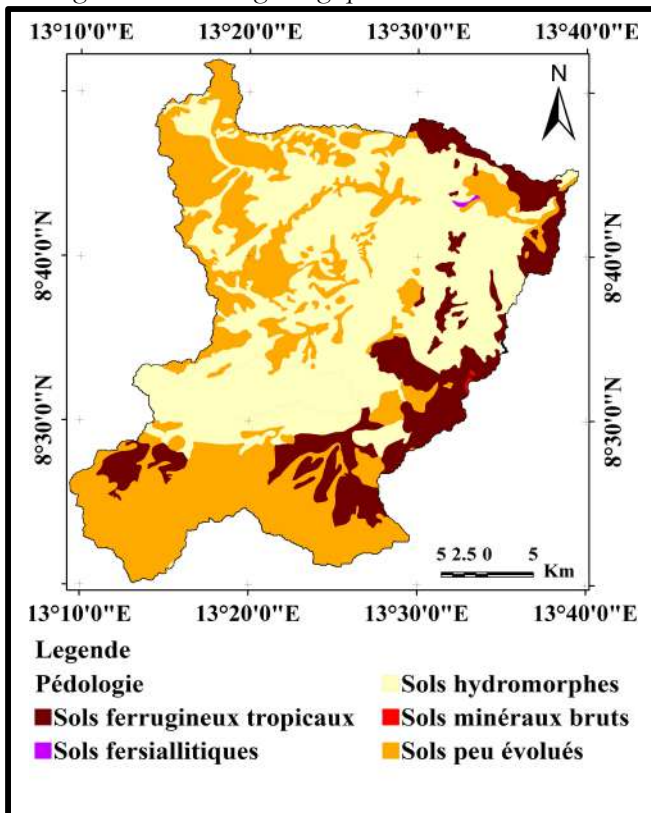


Figure 3a : Carte géologique dans le BVMB



30 (NNE-SSW), N40-50 (NE-SW), N70-80 (ENE-WSW) et N 90-100 (ESE-WNW) se distinguent de l'ensemble et correspondent aux directions majeures. Le rendu de ces extractions a été exporté à son tour dans le logiciel ArcGis pour l'établissement des cartes de densité linéamentaire par la fonction « Line density ». La densité de fracturation du bassin (figure 5a) oscille entre 0,07 et 2,15 Km/Km². Les classes 0,07 – 0,49 ; 0,50 – 0,91 ; 0,92 – 1,32 ; 1,33 - 1,74 ; 1,75 – 2,15 Km/Km² représentent respectivement 4 %, 30 %, 46 %, 19 % et 1 % de la surface du bassin.

L'occupation du sol (figure 5b) a été déterminée à partir de la composition colorée de l'image Landsat 8 OLI. Cette composition colorée est un traitement qui permet de rehausser le contraste des images afin d'optimiser l'analyse visuelle à partir de trois bandes (Koita, 2010). Pour le cas de cette étude, la composition colorée vraie couleur (rouge, verte et bleue) correspondant respectivement aux bandes 4, 3, 2 a permis de discriminer les principales grandes unités d'occupation du sol. Ceci grâce à une classification supervisée (dirigée) disponible dans le logiciel ENVI à travers l'algorithme « Maximum de vraisemblance ». La connaissance des éléments d'occupation du sol renseigne sur l'état du milieu à se laisser traverser par les eaux pluviales qui contribuent favorablement à la recharge des aquifères (Koudou et al. 2013). Les unités d'occupation du sol dans le bassin versant sont entre autres les habitations (2%), les zones inondables et les plans d'eau (9 %), la forêt claire (36%), les sols cultivables (48,4%), les zones montagneuse (5%). Dans la classification hydrogéologique, le couvert végétal limite fortement

l'évaporation et le ruissellement ainsi que le phénomène de croute de battance des pluies au profit de l'infiltration. Le remuage des terres cultivées favorise une bonne infiltration par rapport aux sols non cultivés, les routes bitumées,

les zones montagneuses et les habitations favorisent le ruissellement au détriment de la recharge (Abdelhamid, 2010 ; Shaban et al., 2006).

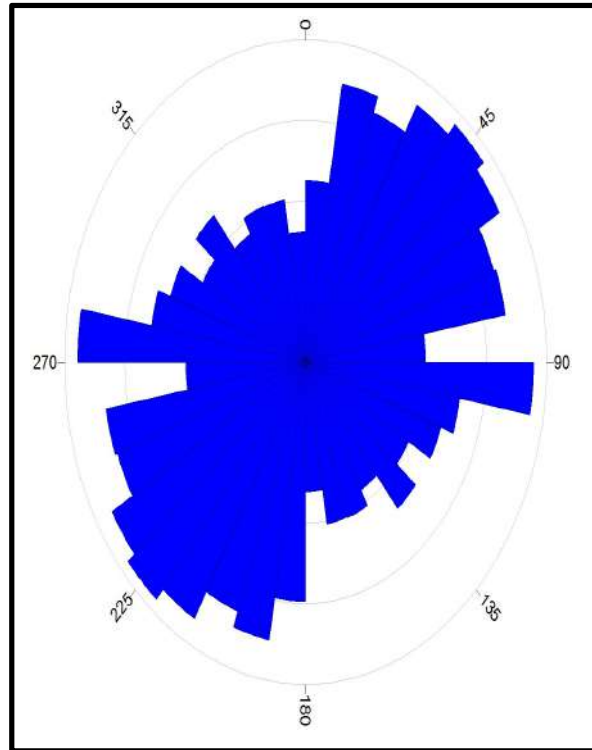
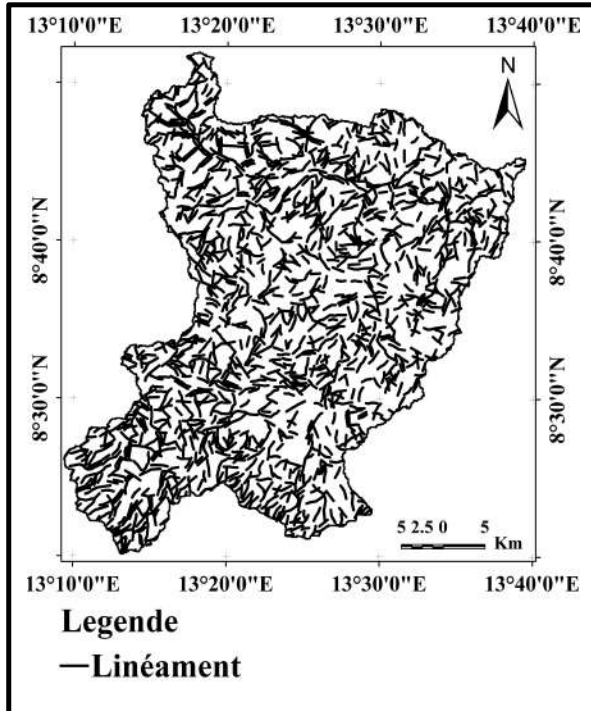


Figure 4 : Carte de fracturation (a) et rosace directionnelle (b) dans le BVMB.

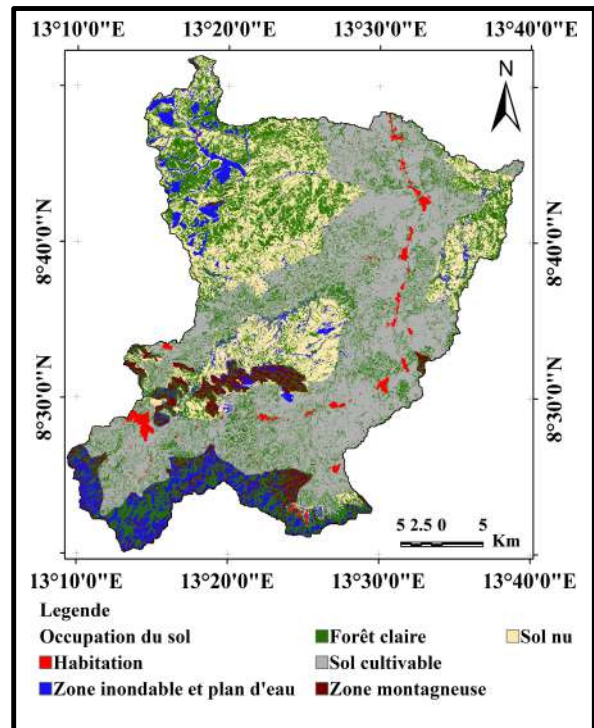
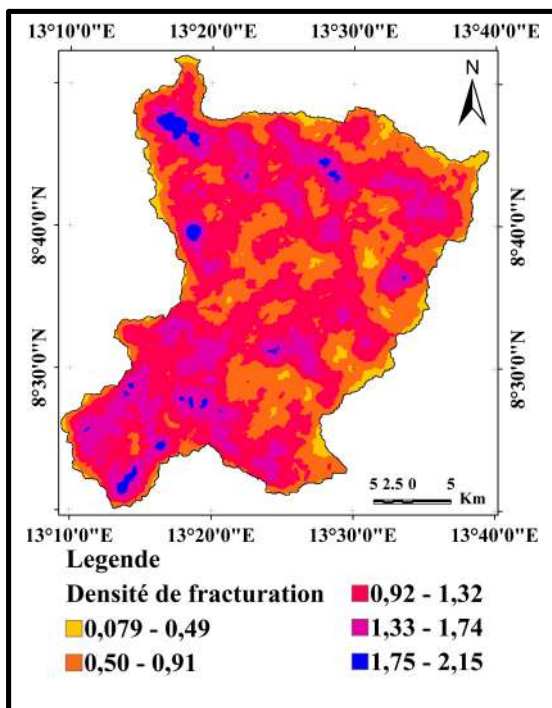


Figure 5 : Carte de fracturation (a) et d'occupation du sol(b) dans le BVMB

La carte de pluie (figure 6a) est obtenue par interpolation des moyennes des précipitations enregistrées entre 2020 et 2021 dans les stations de Poli (1240 mm), de Gouna (1069 mm), de Mayo Galké (1280 mm), de Tongo (1050 mm), de Ngong (1043 mm) et de Lagdo (950 mm). Cette carte indique que la pluviosité diminue du sud vers le nord du bassin. La classe de précipitation 1051 -1089 mm est celle qui prédomine suivie de la classe 1203 -1240 mm.

Les mesures des niveaux statiques effectuées sur le terrain à une cadence mensuelle durant les années 2020 et 2021 ont permis de calculer les

variations des charges hydrauliques à chaque point d'eau suivi entre les saisons sèches et saisons pluvieuses. L'analyse de ces fluctuations montre que la recharge des eaux souterraines dans le bassin versant étudié s'opère entre les mois de mai et d'août avec des importantes lames d'eau infiltrées en juillet. L'amplitude des charges hydrauliques calculée pour l'année 2020 varie entre 2,28 et 9,56 m, soit une moyenne de 6,52 m. Par contre, cette amplitude oscille entre 1,26 et 8,28 m ; soit une moyenne de 5,12 m pour l'année 2021. L'interpolation de ces données dans ArcGis a abouti à une carte d'amplitude annuelle de charge hydraulique (Figure 6b).

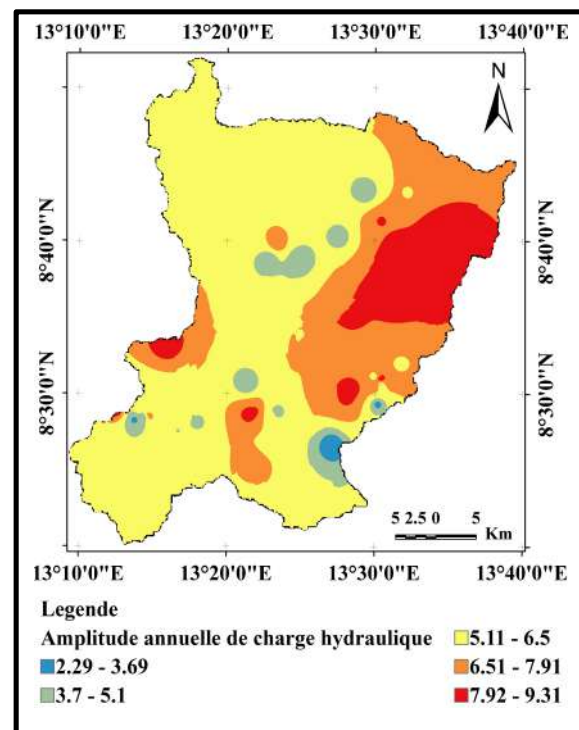
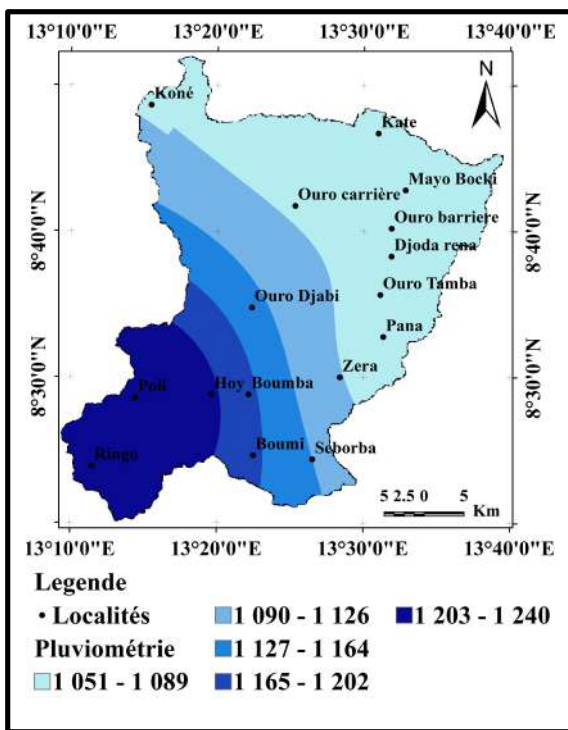


Figure 6 : Carte pluviométrique (a) et d'amplitude annuelle de charge hydraulique (b) dans le BVMB

2.2- Matrice de comparaison des critères et pondération

La pondération a consisté à l'attribution des poids aux différents facteurs de recharge retenus dans cette étude. Pour ce faire, une comparaison par paire des critères a été faite en fonction de leur importance relative dans la recharge suivant l'échelle numérique de Saaty (1990) (tableau 1).

Tableau 1 : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critère.

L'assignation des cotes aux différents facteurs est basée sur les expériences de terrain et les jugements des experts consignés dans des travaux similaires (Yonas et Tesfa, 2021 ; Makonyo et Msabi, 2021 ; Biswajit et Subodh, 2019, Rajasekhar et al., 2019 ;

Abdelhamid,2010). L'analyse comparative des facteurs a permis de générer des matrices carrées à partir desquelles sont déduits les poids de

chaque paramètre (tableau 2). Sur la base du même principe, les cotes ont été affectées à différentes classes de chaque facteur considéré (tableau 3).

La combinaison de tous ces facteurs de recharge s'est faite suivant le model conceptuel présenté par la figure 7.

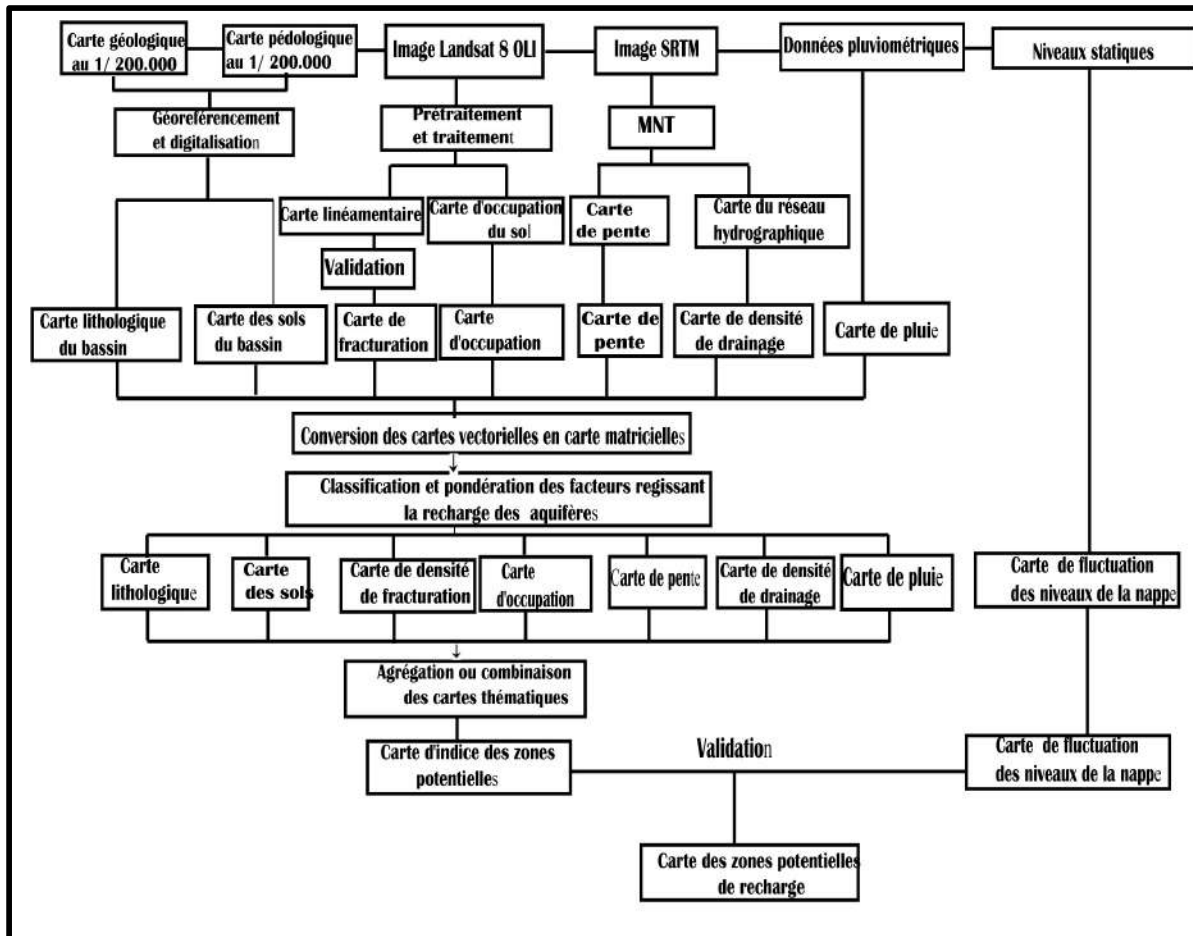


Figure 7 : Model conceptuel des cartes de zones potentielles de recharge dans le BVMB.

Tableau 1 : Expression verbale et numérique de l'importance relative d'une paire de critère

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

Tableau 2 : Matrice de comparaison et coefficient de pondération des différents paramètres

	Pe	Dd	Pl	S	OS	Lit	Df	AAC	Poids
Pente (Pe)	1	3	5	7	3	1/7	1/7	1/5	0,11
Densité de drainage (Dd)	1/3	1	1/5	1/5	1/5	1/7	1/7	1/5	0,02
Pluviométrie (Pl)	1/5	5	1	3	3	1/7	1/5	1/5	0,07
Sol (S)	1/7	5	1/3	1	3	1/5	1/5	1/5	0,05
Occupation du sol (OS)	1/3	5	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/5	0,04
Lithologie (Lit)	5	5	5	1/3	1/3	1	1/5	3	0,23
Densité de fracturation (Df)	7	7	7	5	7	1	1	3	0,32
Amplitude annuelle de charge hydraulique (AAC)	5	5	5	5	5	1/3	1/3	1	0,16

Selon Saaty (1990), la matrice de comparaison générée est validée pour une analyse multicritère que si l'indice de cohérence (IC) est inférieur ou égal à 1.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Avec, IC = l'indice de cohérence, $\lambda_{\max}$ = le maximum des valeurs propres, n = le nombre de paramètre

La détermination de l'IC est précédée par le calcul de $\lambda_{\max}$ dont les étapes sont amplement décrites dans les travaux Onétié et al. (2016), Youan et al.(2015). Dans le cadre du présent travail, $\lambda_{\max}$ calculé donne la valeur de 8,32, n = 8, donc IC = 0,04 (d' 0,1). Ce qui laisse dire que la matrice de comparaison obtenue est cohérente et les coefficients de pondérations correspondent aux poids des différents paramètres.

2.3- Reclassification et agrégation des paramètres

La reclassification des cartes thématiques (format raster) a consisté à attribuer aux valeurs alpha ou aux intervalles définis des valeurs numériques qui sont les cotes des classes de chaque facteur calculé à partir des matrices de comparaison. Cette reclassification a été possible

grâce à la fonction « Reclassify » de ArcGis. La combinaison des différents paramètres s'est faite à partir de la méthode d'agrégation par pondération. Cette dernière consiste à sommer les produits des coefficients de pondération de chaque paramètre par les cotes des classes intraparamétriques. Ces opérations ont été effectuées grâce à l'algorithme « Map algebra » du logiciel ArcGis selon l'équation (3).

$$ZPRES = [(S_r * S_p) + (OS_r * OS_p) + (Df_r * Df_p) + (Li_r * Li_p) + (Pe_r * Pe_p) + (Dd_r * Dd_p) + (Pl_r * Pl_p) + (AAC_r * AAC_p)] \quad (2)$$

Où ZPRES est l'indice de zone potentielle, S = sol, OS= occupation du sol, Df = densité de fracturation, Li= lithologie, Pe= pente, Dd= densité de drainage, Pl= pluviométrie, r et p correspondent respectivement à la cote et au poids des couches.

2.4 – Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a permis d'analyser un modèle mathématique en étudiant l'impact de la variabilité des facteurs d'entrée du modèle sur la variable de sortie (Jacques, 2005, Adel et al., 2020). C'est une importante composante d'un projet de modélisation, car elle a permis l'évaluation de la précision du résultat (Aouragh et al., 2016). Dans le cas d'espèce, l'analyse de sensibilité effectuée visait à évaluer l'influence de

Tableau 3 : Classification, évaluation et standardisation des facteurs de la recharge

Paramètre	Classe	Matrice de comparaison					Côte
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	
Sol	[1] Sols fersiallitiques	1					0,45
	[2] Sols ferrugineux	1/3	1				0,25
	[3] Sols peu évolués	1/3	1/3	1			0,17
	[4] Sols minéraux bruts	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] Sols hydromorphes	1/7	1/5	1/5	1/3	1	0,04
	Ratio de cohérence (RC) = 0,07						
Occupation du sol	[1] Terres cultivées	1					0,47
	[2] Forêts claires	1/3	1				0,27
	[3] Sols nus	1/5	1/3	1			0,14
	[4] Zones inondables et plan d'eau	1/5	1/5	1/3	1		0,08
	[5] Zones habitées et montagnes rocheuses	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0,04
	Ratio de cohérence (RC) = 0,08						
Densité de fracturation	[1] 1,8-2,2	1					0,44
	[2] 1,4-1,7	1/3	1				0,26
	[3] 0,92-1,3	1/3	1/3	1			0,16
	[4] 0,5-0,91	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] 0,07-0,49	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0,05
	Ratio de cohérence (RC) = 0,06						
Lithologie	[1] Grès, conglomérat et alluvion	1					0,48
	[2] Basalte, Métabasalte Trachyte et Rhyolite	1/3	1				0,24
	[3] Métadiorite, Amphibolite et Gabbro	1/5	1/3	1			0,15
	[4] Granite, Métagranite et syénite	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] Schiste et micaschiste	1/7	1/5	1/5	1/3	1	0,04
	Ratio de cohérence (RC) = 0,07						
Pente (en degrés)	[1] 0 – 1,66	1					0,48
	[2] 1,67 – 4,15	1/3	1				0,24
	[3] 4,16 – 8,14	1/5	1/3	1			0,15
	[4] 8,15 – 14,12	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] 14,13- 77,99	1/7	1/5	1/5	1/3	1	0,04
	Ratio de cohérence (RC) =0,07						
Densité de drainage (indice)	[1] 0 - 40,71	1					0,48
	[2] 40,72 -81,41	1/3	1				0,24
	[3] 81,42 -122,12	1/5	1/3	1			0,15
	[4] 122,13 – 162,82	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] 162,83 – 203,53	1/7	1/5	1/5	1/3		0,04
	Ratio de cohérence (RC) = 0,08						
Pluviométrie	[1] 1203 - 1240	1					0,41
	[2] 1165 – 1202	1/3	1				0,25
	[3] 11271 – 1164	1/5	1/3	1			0,17
	[4] 1090 – 1126	1/3	1/3	1/3	1		0,11
	[5] 1051 – 1089	1/5	1/3	1/3	1/3	1	0,06
	Ratio de cohérence (RC) = 0,06						
Amplitude Annuelle de Charge hydraulique	[1] 2,29 - 3,69	1					0,48
	[2] 3,7 - 5,1	1/3	1				0,24
	[3] 5,11 - 6,5	1/5	1/3	1			0,15
	[4] 6,51 -7,91	1/5	1/3	1/3	1		0,09
	[5] 7,92 – 9,31	1/7	1/5	1/5	1/3	1	0,04
	Ratio de cohérence (RC) = 0,07						

chaque paramètre sur la carte d'indice des zones potentielles de recharge. Pour y parvenir, le test de sensibilité par suppression d'un paramètre a été effectué. Ce test développé par Lodwich et al.(1990) consiste à évaluer la sensibilité de la

carte des zones potentielles de recharge en supprimant un paramètre ayant participé à la conception de cette dernière. Ainsi, il permet paricochet de déterminer la couche thématique la plus ou la moins influente pour la recharge des

eaux souterraines. Cette sensibilité est calculée à 7 reprises dans ce travail par l'équation (4)

$$S = \left[\frac{\left| \frac{ZPRES}{N} - \frac{ZPRES'}{n} \right|}{ZPRES} \right] * 100$$

Où S est la sensibilité mesurée exprimée en termes d'indice de variation, ZPRES est l'indice des zones potentielles de recharge des eaux souterraines calculé à partir de toutes les couches thématiques, ZPRES' est l'indice des zones potentielles de recharge des eaux souterraines calculé après la suppression d'un seul paramètre, N et n sont le nombre de calques ou de paramètres utilisés dans le calcul des indices.

3-RESULTATS

3.1- Zones potentielles de recharge des eaux souterraines

La combinaison des cartes thématiques à partir de leurs poids ainsi que ceux de leurs classes a permis d'obtenir une carte d'indice des zones potentielles de recharge. Cette carte exprime l'aptitude que possède un espace à infiltrer de l'eau sollicitant sa surface (figure 8). Les valeurs des indices obtenus varient entre 0,012 et 0,44, soit une moyenne de 0,19 et un écart-type de 0,04 (figure 8). Elles sont subdivisées en cinq classes notamment :

- Les zones à très faible potentialité occupent 3 % de la surface cartographiée. Celles-ci se rencontrent sur les sols encroutés, des lithosols ou des affleurements rocheux et se situent principalement aux abords de la ligne de partage des eaux du bassin. Quelques poches importantes de ces zones sont notées dans la partie centrale autour de Ouro Djabi ;
- Les zones à faible potentialité couvrent environ 55% de la superficie du bassin et apparaissent majoritairement dans les bordures Sud, au Nord-Ouest, au Centre. Quelques poches de ces zones sont également disséminées au

Nord-Est du bassin. Ces classes sont caractérisées par des pentes fortes, des faibles densités de fracturation, des fortes densités de drainage et des lithosols ou des sols peu évolués. Toutes ces conditions réunies ne favorisent pas une bonne recharge des réservoirs aquifères.

- Les zones à potentialité moyenne occupent 39 % de la zone d'étude. Elles sont s'alignent préférentiellement suivant la direction NE-SE ;
- Les zones à forte potentialité (figure 8) couvrent environ 2,5 % de la zone d'étude. Elles forment des poches isolées au Sud-Ouest au Nord – Est du bassin. Celles-ci offrent des bonnes conditions de recharge avec des pentes relativement faibles, des fortes densités de fracturations et une faible densité de drainage,
- Les zones à très forte potentialité représentent 0,5 % du bassin étudié et apparaissent en forme d'îlots isolés au Sud de Poli et dans les localités de Hoy, Sirdjam, Mayo Bocki et Katé (figure 9). Ces zones offrent les possibilités de formation d'importantes de réserves d'eau souterraine par la recharge artificielle ou naturelle. Ce sont des zones autour desquelles il faut définir des périmètres de protection, car le transfert des contaminants de la surface vers les aquifères en ces zones est très rapide.

3.2- Analyse de sensibilité

Les valeurs calculées de l'indice de sensibilité par suppression d'un paramètre sont consignées dans le tableau 4. Il en ressort que les couches thématiques les plus sensibles dans l'identification des zones potentielles de recharge sont celles de la lithologie, de la fracturation, d'amplitude de charge hydraulique et le type de sol avec des indices de variation moyen de 3,32 %, 3,49 %, 3,15% et 3,71% respectivement. Ces couches sont les plus sensibles en raison des poids théoriques relativement élevés qui leur sont attribués et sont par conséquent considérées comme les plus influentes pour cartographier les zones potentielles de recharge dans le BVMB. De

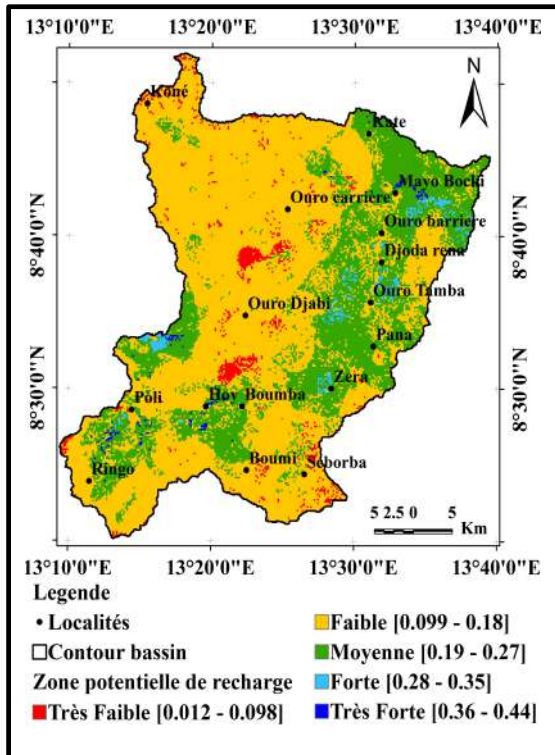


Figure 8: Carte des zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le BVMB

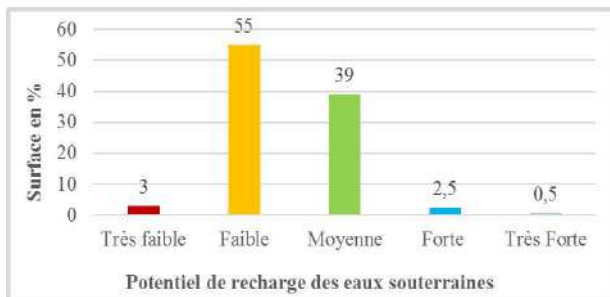


Figure 9 : Proportion occupée par le potentiel de recharge des eaux souterraines

même, la suppression des facteurs comme la pluviométrie, la pente et la densité de drainage ont un impact important sur la carte finale. Le paramètre le moins influent pour la détermination des zones préférentielles de recharge est l'occupation du sol avec un indice de variation moyen de 0,05 %. Ainsi, l'ordre de sensibilité des couches thématiques est Lit > Sol > AACH > Df > Pl > Pe > Dd > OS. Dans l'ensemble, ce test révèle que presque tous les facteurs considérés sont nécessaires pour la cartographie des zones potentielles de recharge dans le BVMB.

Tableau 4 : statistique (en %) sur la sensibilité par suppression d'un paramètre

Paramètre supprimé	Indice d'analyse de sensibilité (%)			
	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Pente	0,16	2,47	1,47	0,04
Densité de drainage	0,79	2,47	1,98	0,04
Pluviométrie	0,82	3,26	3,01	0,04
Sol	1,9	4,67	3,71	0,05
Occupation du sol	0,71	1,32	0,05	0,03
Lithologie	2,91	4,74	3,32	0,05
Densité de fracturation	1,11	4,5	3,49	0,06
Amplitude de charge hydraulique	2,34	4,62	3,15	0,05

4- DISCUSSION

La cartographie des zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le bassin versant du Mayo Bocki a été réalisée au moyen des SIG et de l'analyse multicritère. Ces outils ont été utilisés par de nombreux auteurs pour mettre en exergue les zones préférentielles d'infiltration dans leurs travaux (Makonyo et Msabi, 2021 ; Biswajit et Subodh, 2019, Rajasekhar et al., 2019 ; Sing, 2018). Ils ont permis par ailleurs à d'autres auteurs (Yonas et Testa, 2021 ; Cocker et al., 2020 ; Affoué et al., 2016 ; Koffi et al., 2016) d'identifier les zones favorables à l'implantation des forages à gros débits. Les différents paramètres régissant ou témoignant la recharge retenue dans cette étude sont également ceux considérés par certains auteurs comme Makonyo et al. (2021) ; Ibrahim et Moussa (2020) ; Aju et al. (2020) ; Adel et al. (2020) ; Aké et al. (2018) ; Sékouba et al. (2017) ; Abdoubabayé (2012) pour identifier les zones potentielles de recharge dans leurs travaux. D'autres chercheurs comme Yonas et Tesfa (2021) ; Koudou et al. (2013) ; Dhekra et al. (2018) estiment que ces paramètres d'entrée peuvent aller au-delà de ceux utilisés dans le cadre de cette étude en incluant la géomorphologie, l'épaisseur du manteau d'altération et la perméabilité des formations géologiques. Le nombre de critère (08) pris en compte dans ce travail est proche de celui recommandé par Saaty (1990). Selon ce dernier le choix de paramètres doit s'arrêter à sept par niveau

de hiérarchisation (Aké et al., 2018), car lorsque le nombre de critère est trop nombreux, le risque d'incohérence de jugement est trop élevé, ce qui rend difficile la mise en œuvre de la méthode Saaty (Roy, 1995 in Youan et al., 2015). Les limites des différentes classes paramétriques ne doivent pas être perçues comme des barrières tangibles mais plutôt comme des zones de transition des différentes classes (Sékouba et al., 2017 ; Koudou et al., 2013 ; Jourda et al., 2006).

La carte des zones potentielles de recharge indique que les fortes potentialités occupent une faible proportion (3%) dans le BVMB par rapport aux faibles (58 %) et moyennes (39%) potentialités. Ces résultats pourraient justifier le fort taux d'échec enregistré lors de l'exécution des ouvrages de captage dans ce bassin comme avait souligné Djeuda (1987) dans ses travaux. Les zones à fort potentiel sont celles autour desquelles il faut définir des périmètres de protection, car le transfert des contaminants de la surface vers les aquifères en ces zones est très rapide (Aké et al., 2018 ; Huet 2015 ; Ewodo et al. 2015). Ces zones peuvent également être ciblées pour accroître le potentiel hydraulique des aquifères par la recharge artificielle. La prédominance des zones à faible potentiel dans le bassin serait favorisée par la faible épaisseur du manteau d'altération qui limite fortement la fonction de stockage des aquifères d'altérites et la faible densité de fracturation limitant l'infiltration ou la fonction conductrice des aquifères de socle. Des études similaires ont été aussi réalisées dans certaines parties du Cameroun. Jofack (2016) a utilisé la même méthodologie pour cartographier la potentialité des ressources en eau souterraine dans les hauts plateaux de l'Ouest. Ces travaux ont révélé que les classes à potentialité très forte, forte et moyenne dominant avec respectivement 18,06 %, 26,54% et 28,73% alors que seulement une fine partie est couverte par les classes faibles (17,66%) et très faible (9,02%). Ndonang (2017), dans ses travaux dans le bassin de Kalio (Extrême- Nord)

a abouti aux résultats selon lesquels les zones à potentielle moyenne et forte représentent respectivement 34% et 15% de la surface totale du bassin. Par ailleurs, les travaux de Aké et al. (2018), Sékouba et al. (2017) respectivement dans les régions de Bonoua et N'zo en Côte d'Ivoire ont indiqué que les zones à potentielle forte occupent environ 66% et 20%. Ibrahim et Moussa (2020) ont obtenu une proportion de 3,4% occupées par les zones à potentiel de recharge élevé dans la région de Dosso au Sud-Ouest du Niger. En Inde, Biswajit et al. (2019), Rajesekhar et al. (2019) ont aussi fait recours aux techniques géospaciales et à l'analyse multicritère pour délimiter les zones potentielles de recharge respectivement à Bengal et à Julladubanderu. Les résultats obtenus montrent que les zones à fort potentiel occupent environ 24% et 53% des surfaces investiguées.

CONCLUSION

Les zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le bassin versant du Mayo Boki ont été identifiées par l'analyse multicritère basée sur les techniques géospaciales. Au total sept facteurs notamment la pente de terrain, la densité de drainage, la pluviométrie, la lithologie, la densité de fracturation, le type de sol et l'occupation du sol ont été considérés dans cette étude. La carte obtenue par combinaison de ces facteurs indique que les zones à fort potentiel occupent 3 % de la zone d'étude pendant que les zones de faible à faible potentialité sont de l'ordre de 58 % dans le bassin. Les zones à potentialité moyenne quant à elles représentent 39%. Elle constitue un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de l'eau en matière de prospection, d'accroissement du potentiel hydraulique par recharge artificielle et de la préservation de la qualité de l'eau. Pour affiner ces résultats, il sera judicieux d'étudier la perméabilité des faciès lithologiques et des types de sol afin de minimiser la subjectivité dans la pondération des paramètres

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelhamid H., Abderrahmane B., Fatima Z. H., et Nedjai R. (2010). Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride. Cas de la plaine d'El Outoya en Algérie. *Eurojournal*, p 3, 5,7
- Abdou Babayé (2012). Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako – Niger). Thèse de doctorat, Université de Liège, p 2006-2014.
- Adel Z., Ali M., Mohamed H.M., Amira M., Lahcen Z., Taupin J.D, Chekirbane A., Chenini I. and Tarhouni J. (2020). Using analytical hierarchy Process and multi-Influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid mediterranean coastal aquifer. *Water* 2020, p 12
- Affoué B. Y., Bi Tié G., Alioune K., Mangoua J. M. et Kouamé A. K. (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*, 61:5, p 856-867.
- Ahmad, I., Dar, M.A., Andualem, T.G., Tekla, A.H., Tolosa, A.T. (2020). GIS-based multicriteria evaluation of groundwater potential of the Beshilo river basin, Ethiopia. *Journal African Earth Science*. p164.
- Aké G. E., Kouame, K. J., Koffi, A. B. et Jourda, J. P. (2018). Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31 (2), 129–144.
- Aké G.E., Kaoudio H.B., Dongo K., Dibi B., Kouamé F.K., Biémi J. (2010). Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol.Chim. Sci* , p4.
- Aju C.D., Achu, A.L., Raicy M.C, Rajesh R., 2021. Identification des structures et sites appropriées à la recharge artificielle des eaux souterraines pour une gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Vamanapuram (Sud Inde). *Journal de Hydrorecherche*, p 2-3.
- Andualem, T.G., Demeke, G.G. (2019). Estimation du potentiel des eaux au moyen des SIG et de la télédétection: Etude du cas de la region de Guna Tana, dans le bassin supérieur du Nîle, Ethiopie. *J. Hydrol*, p. 24.
- Aouragh, M. H., Essahlaoui, A., Ouali, A. El, & Hmaidi, A. El. (2016). Groundwater potential of Middle Atlas plateaus, Morocco, using fuzzy logic approach, GIS and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, p7.
- Brabant P. et Humbel F. (1984). Notice explicative N 51 et carte pédologique du Cameroun, feuille Poli au 1/ 200.000.
- Bassahak, J. (1988). Le complexe plutonique du massif de Kogué (Poli, Nord Cameroun).Pétrologie, géochimie, pétrologie structurale. Sa place dans le plutonisme de la chaîne panafricaine au Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat, Université de Nancy-I, 259 P.
- Biswajit D.,Subodh C. P. (2019). Combinaison des SIG et de l'analyse multicritère pour delimitier les zones de recharge potentielles dans la zone de Goghat-II block, Est de Bengal, Inde, *Journal of Hydroresearch*.
- Castany G. (1998). Principe et méthode de l'hydrogéologie. Ed. Dunad, Paris, pp 120, 129, 157, 172, 178,181 Caude Bernard, Lyon, p 210.
- Cocker F., Vodounou J.B. et Yabi J. (2020). Cartographie du potentiel en eau souterraine de la basse vallée de l'Ouémé, sud-Bénin (Afrique

de l'Ouest). La Houille Blanche 2020, 2, p 74–85.

Chantry G., Favreau G., Travi Y. (2003). Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride par la méthode du bilan des chlorures (MBC). Rapport de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Supérieures en Gestion Intégrée des Ressources Hydriques. P14-16

Detay M. (1987). Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance hydrogéologique subsaharienne. Application au Nord Cameroun. Thèse de Doctorat, Université de Nice, p 238.

Dhekra S., Mohamed H. M., Lahcen Z., Chenini I., Moufida El M. & Mahmoud D. (2018). Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia, Hydrological Sciences Journal, p14 -15.

Dieng M. P., Papa B. D., Mahécor D., Mamado S., El Hadji (2020). Estimation de la recharge de la nappe libre de la zone des Niayes (Sénégal) par la méthode du bilan de Thornthwaite. International Journal of Advanced Research (IJAR), p1.

Dumont J.F, Toteu S. F., Penayé J. (1985). Ensemble structuraux et principales phases de déformations panafricaines dans la zone mobile du Nord Cameroun, région de Poli. MESRES. Revue sciences et techniques. P 9- 23

Ibrahim A., et Moussa K. (2020). Identification et cartographie des zones potentielles de recharge des eaux dans la région de Dosso (sud-ouest ;

Niger) par analyse multicritère. European Scientific Journal. p4

Djeuda T. H. (1987). Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique Centrale : région de Poli, Nord – Cameroun. Thèse de doctorat, Université scientifique et Médicale de Grenoble, 2, 227, 235, 268 p.

Edmunds WM, Fellman E, Goni IB, Prudhomme C. 2002. Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigéria. *Hydrogeol. J.*, p 205-215.

Ewodo M. G., Ombolo A., Kouame K. J., Bon A.F., et Bineli E. (2015) : Evaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant de la Mingosso (région de Yaoundé) par les méthodes paramétriques DRASTIC, SI et GOD. International Journal of Innovation and Applied Studies (IJIAS). Vol. 12 No. 1, pp. 266-286.

Fantong W.Y., Satake H., Aka F.T., Ayonghe S.N., Asai K., Mandal A.K., Ako Ako A. (2010) Hydrochemical and isotopic evidence of recharge, apparent age, and flow direction of groundwater in Mayo Tsanaga River Basin, Cameroon: bearings on contamination. *Environ Earth Sci*; p 6.

Feumba R. A. (2017). Adaptation planifiée de l'Etat aux impacts de la variabilité des changements climatiques au Cameroun de 1960 à 2015. Thèse de Doctorat/Ph D de l'Université de Ngaoundéré, p 498.

Houketchang B. M., (2010). Contraintes pétrologiques et chemins P-T-t des ensembles métamorphiques de Banyo, Buffle noir, Poli et Figuil dans le Centre-Nord Cameroun : implications sur la géodynamique de la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. Thèse de Doctorat ph D, Université de Yaoundé.

Huet M. (2015). Comparaison des méthodes d'estimation de la recharge des aquifères : Exemple de la région Charlevoix-Cote-Nord. Mémoire de Maitrise en sciences de la Terre, Université de Québec à Chicoutimi, p 12.

j

Jourda P., Saley M., Djagoua E. et al. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère et test de validation. *Revue Internationale Télédétection*, vol. 5, 4, p 339-357.

Jofack S. V. (2016). Cartographie des potentialités en eaux souterraines dans les hauts plateaux de l'Ouest Cameroun : Contribution de la télédétection, des SIG et des réseaux neurones. Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, p 116.

Koffi K. M., Yao K. T., Mobio A. et Oga Y. M. S. (2016). Apport de l'analyse multicritère à la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages dans la région de Gagnoa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *Geo- Eco- Trop*, p 4-8.

Koita M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Montpellier II, sciences et techniques du languedoc, p1

Koudou A., Adiaffi B., Assoma T.V., Sombo A.P., Amani E.M.E & Biemi J (2013). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire *Geo-Eco-Trop.*, 2013, 37, 2 : 211-226.

Lerner D.N., Issar A.S., Simmers I. (1990): Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH IntContribHydrogeol 8. Heinz Heise, Hannover, p345.

Mohamed A.S., Marlin C., C. Leduc, C. & Jiddou M. (2012). Modalités de recharge d'un aquifère en zone semi-aride : cas de la nappe du Trarza (Sud-Ouest Mauritanie), *Hydrological Sciences Journal*, , p4.

Makonyo M., Msabi M. M. (2021). Identification of groundwater potential recharge zones using GIS- based multicriteria decision analysis: a case study of semi-arid midlands Manyara fractured aquifer, North-Eastern Tanzania. *Remote Sensing Applications: society and Environments*, p32.

Nampak, H., Pradhan, B., Abd Manap, M., 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *J. Hydrol.*, p513, 283–300.

Ngako, V. (1986). Evolution métamorphique et structurale de la bordure du Sud-ouest de la "Série poli", segment camerounais de la Chaîne Panafricaine. Mémoires et documents du C.A.E.S.S., Rennes, p 5, 158.

Ndonang T.L. (2017). Contribution de la cartographie multicritère et de la télédétection à l'étude de la recharge des eaux dans le bassin versant de Kalio (région de l'Extrême –Nord Cameroun). Mémoire en Ingénierie de conception en Maitrise et Hydraulique des eaux, ENSP de l'Université de Maroua, p54.

Njel, U. O. (1988). Contribution à l'étude de l'orogénèse Panafricaine. La ceinture volcano-sédimentaire de Poli (Nord-Cameroun) : lithostratigraphie, paléogéographie, pétrographie,

géochimie, minéralisations cuprifères associées. Thèse Doctorat de l'I.N.P.L., p 220.

Nouayti N., Khattach D., Mohamed H. (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. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2017, n° 39, 45-57. e-ISSN : 2458-7184

Mussa, K.R., Mjemah, I.C., Machunda, R.L. (2020). Open-source software Application for hydrogeological delineation of potential groundwater recharge zones in the Singida semi-arid; fractured aquifer, central Tanzania. Hydrology 7(2), p28.

Onétié Z/ O., Lasm T., Coulibaly A., Baka D. (2016). Apport du SIG et de l'analyse multicritère dans la prospection hydrogéologique du socle précambrien de Gagnoa (Centre – Ouest de la cote d'Ivoire). European Scientific Journal, Edition vol.12 ISSN : 1857-7881 (Print) e-ISSN1857-7431.

Penaye, J. (1988). Pétrologie et structure des ensembles métamorphiques au Sud-Est de Poli (Nord Cameroun). Rôles respectifs du socle protérozoïque inférieur et de l'accrétion crustale panafricaine. Thèse de Doctorat, I.N.P.L., Nancy, 196 p.

Pinatibi H., Coulibaly N., Coulibaly T.J, Savane I. (2015). Cartographie des potentialités en eaux souterraines par l'utilisation de l'analyse multicritère et les SIG : Cas du district de Denguelé (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal, édition vol 11, N035ISSN : 1857-7881, p8.

Rajasekhar M., Sudarsana G.R., Sreenivasulu Y., Siddi R. (2019). Delineation of groundwater

potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzylogic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches, Journal of *Hydroresearch*, p 9

Saaty, T. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *E.J.O.R.*, p48-1, 9-26.

Sékouba O., Gnangui C.A., Akpa L. Y., Mahaman B. S., Kouamé K. F., Therrien R. (2017). Identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du bassin versant du N'zo (Ouest De La Côte d'Ivoire) : contribution du SIG et de la télédétection. European Scientific Journal, édition Vol.13, No.36 ISSN: 1857 – 7881, p 194-197.

Saravanan, S., Saranya, T., Jennifer, J.J., Singh, L., Selvaraj, A., Abijith, D., 2020. Delineation of groundwater potential zone using analytical hierarchy process and GIS for Gundihalla watershed, Karnataka, India. Arab. J. Geosci. 13 (15), 1–17.

Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol. Journal*. 14 (4), 433–443.

Soro D. D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fissuré : cas du site expérimental de Sanon (région de plateau central au Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie- Curie Paris, p164.

Toteu S .F., Michard A., Bertrand J. M., and Rocci G. (1987). U/Pb dating of precambrien rocks from northern Cameroon, orogenic evolution and chronology of the panafrican belt of central Africa. *Precambrien Res.*37: 71-87.

Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., and Penaye, J. (2006). The Precambrian of Central Africa: Summary and perspectives. *Journal of African Earth Sciences*. 44, Editorial, vii-x.

Vissin E.W. (2000). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.

Viguié B. (2016). Caractérisation des facteurs de contrôle de la recharge et des écoulements souterrains à différentes échelles de temps en zone de piedmont aride et hyper-aride : exemple de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal (Nord Chili). Hydrologie. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONTT180. tel-01689972.

Yonas G. H., Tesfa G. A. (2021). Geospatial and multi-criteria decision approach of groundwater potential zone identification in Cuma sub-basin, Southern Ethiopia, *Journal Heliyon* p 3,8.

Youan T. M., Lasm T., Jourda J. J., Mahaman B. S., Miessan A. G., Kouamé K., Biémi J. (2015). Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique*. Volume 21 – n° 1/2011, p 43 – 71.