

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

Sékouba Oularé

Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d’Ivoire

Gnangui Christian Adon

Lucette You Akpa

Mahaman Bachir Saley

Fernand Koffi Kouamé

Centre Universitaire de Recherche et d’Application en Télédétection
(CURAT), Côte d’Ivoire

René Therrien

Université Laval, Québec, Canada.

Doi: 10.19044/esj.2017.v13n36p192 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192)

Abstract

In a watershed one of the most important data is recharge because it is the main groundwater supply. Recharge is however, a difficult parameter to calculate due to its variability. The objective of this study is to propose a method of identifying potential recharge zone which is applicable to large watersheds. The study area is the N’zo watershed located in the West of Côte d’Ivoire. It covers an area of 4,300 km². The water supply of the population is essentially ensured by the fractured aquifers which are the regional aquifers. The data used in this study are classified in two groups 1) the cartographic data are composed of geological soil and drainage maps; and 2) data from remote sensing which consist of slope, land use and fractures maps. These data are combined through a multi-criteria analysis to facilitate spatial analysis and identification of potential recharge areas. The results indicate that potential areas of high recharge account for about 20% of the total watershed area. They are mainly located in the south and center and appear fragmented in the north of the watershed.

Keywords: Watershed, N’zo, recharge zone, GIS, remote sensing

Résumé

Dans un hydrosystème l'une des données les plus importantes est la recharge car elle est la principale source d'alimentation de la nappe phréatique. La recharge est cependant, un paramètre difficile à calculer en raison de sa variabilité. L'objectif du présent travail est de proposer une méthode d'identification des zones potentielles de recharge des aquifères applicable aux grands bassins versants. La zone d'étude est le bassin versant du N'zo à Kahin situé à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Elle couvre une superficie de 4300 km². L'approvisionnement en eau de la population est assuré essentiellement par les aquifères fracturés qui sont les aquifères régionaux. Les données utilisées dans cette étude sont classées en deux groupes : 1) les données cartographiques qui sont composées des cartes géologique, pédologique et hydrographique ; et 2) les données issues de la télédétection qui sont constituées des cartes de pente, d'occupation du sol et de fracturation. Ces données sont combinées à travers une analyse multicritère pour faciliter l'analyse spatiale et l'identification des zones potentielles de recharge dans le bassin versant. Les résultats indiquent que les zones potentielles de recharge élevée représentent environ 20 % de la superficie totale du bassin versant. Elles sont localisées majoritairement au sud et au centre et apparaissent de manière fragmentée au nord du bassin versant.

Mots clé : Bassin versant, N'zo, zones de recharge, SIG, Télédétection

Introduction

La gestion durable et la pérennité des ressources en eau nécessitent la connaissance et l'évaluation de trois processus fondamentaux dans un hydrosystème : la recharge, les écoulements et la décharge (Cook et Robinson, 2002 ; Cook *et al.*, 2006 ; Sarah *et al.*, 2006 ; Gleeson, 2009). La recharge fait référence au volume d'eau infiltrée qui atteint la nappe tandis que la décharge est définie comme la quantité d'eau souterraine qui se déplace du milieu souterrain vers la surface où elle se décharge discrètement. Les zones humides, les lacs, les ruisseaux et les rivières sont les exemples de décharge les plus connus. Parmi ces trois processus, la recharge est la composante la plus importante car les écoulements souterrains et les décharges dépendent fortement de ce paramètre (Sanford, 2002 ; Cook *et al.*, 2006). La connaissance de la recharge est primordiale dans la gestion durable des ressources en eau, car elle permet d'identifier les zones d'un aquifère qui sont vulnérables à la contamination, de déterminer son potentiel d'exploitation et d'évaluer la pérennité de la ressource (Scanlon, *et al.*, 2002). Cependant, la recharge demeure sans doute la composante de l'écoulement souterrain la plus difficile à quantifier, à la fois dans l'espace et dans le temps

en raison de sa variabilité (Lerner *et al.*, 1990). A ce séjour il n'existe aucune méthode universelle applicable pour estimer la recharge des aquifères. En effet, plusieurs méthodes d'estimation de la recharge sont disponibles dans la littérature. Nous avons entre autres, les méthodes hydrauliques, isotopiques, thermiques, numériques, etc. (Sharma *et al.* 1980 ; Allison, 1988 ; Lerner *et al.* 1990 ; Solomon *et al.*, 1993 ; Lerner, 1997 ; Simmers, 1997 ; 2002 ; Healy et Cook, 2002).

Dans les aquifères poreux situés sous climat humide, la recharge est relativement homogène à l'échelle locale et généralement quantifiée à l'échelle du mois ou de l'année (Heppner *et al.*, 2007). A l'échelle régionale le flux de la recharge est très variable, il est contrôlé par les zones de recharge rapide, localisées dans les dépressions topographiques. A ces endroits les flux sont significatifs et dépassent largement le flux déterminé à partir du bilan annuel (Hayashi *et al.*, 2003 ; French et Binley, 2004). En milieu de socle fracturé l'analyse des zones et des flux de recharge à l'échelle locale est beaucoup plus complexe contrairement aux aquifères poreux. Cette complication est due à l'existence des voies d'écoulement préférentiel dans les fractures et à la méconnaissance des connexions verticales entre les fractures (Gleeson, 2009). Les remontées rapides et significatives de la nappe observées durant ou après une averse dans les aquifères fracturés sur des sites expérimentaux sous diverses conditions climatiques sont les exemples de l'existence des zones préférentielles de recharge (Degallier, 1977 ; Rodhe et Bockgard, 2006 ; Gleeson, 2009). Ces zones préférentielles de recharge ne peuvent pas être appréhendées par les méthodes expérimentales en raison de la surface restreinte étudiée (Gburek et Folmar, 1999 ; Rodhe et Bockgard, 2006 ; Praamsma, *et al.*, 2009). En effet, la variabilité spatiale de la recharge ne peut être appréhendée qu'à l'échelle régionale ou d'un grand bassin versant. A cette échelle, les approches d'étude sont largement basées sur les techniques spatiales notamment la télédétection et les SIG (Saraf *et al.*, 1998 ; Krishnamurthy *et al.*, 1996 ; 2000 ; Shaban *et al.*, 2006 ; Sener *et al.*, 2005). La télédétection permet de produire les cartes thématiques qui sont diverses et dépendent de l'objectif de l'étude et du type de milieu étudié. En milieu de socle fracturé, les cartes thématiques couramment utilisées pour l'étude de la recharge sont les cartes d'occupation du sol, de fractures, de géologie, de pentes, et du réseau hydrographique. La diversité de ces cartes requiert leur intégration ou combinaison afin de rendre possible une analyse spatiale de la recharge. Ainsi, les SIG sont généralement utilisés pour intégrer les cartes thématiques avec une précision suffisante dans un délai raisonnable. Par ailleurs, les techniques spatiales ont l'avantage de couvrir des superficies de plusieurs centaines ou milliers de km² pour des coûts faibles, permettant ainsi d'appréhender la variabilité spatiale de la recharge à l'échelle régionale,

contrairement aux approches expérimentales (hydrauliques, isotopiques et thermiques) qui sont des études locales et très onéreuses.

L'objectif de cette étude est de cartographier les zones potentielles de recharge des aquifères fracturés à partir des techniques spatiales notamment la télédétection et les SIG. Ces techniques s'adaptent bien à notre zone d'étude qui est un grand bassin versant s'étendant sur plusieurs milliers de km². Cette approche permet d'accéder aux informations préliminaires importantes pour la première fois sur la distribution spatiale de la recharge dans la zone d'étude. La méthodologie est essentiellement basée sur la description, la classification et de l'intégration des principaux facteurs influençant la recharge tels que l'occupation et le type de sol, la géologie, les fractures, les pentes et le réseau hydrographique.

Présentation du bassin versant du N'zo à Kahin

Le bassin versant du N'zo à Kahin est un sous-bassin du bassin versant de Sassandra. Il est situé entre les longitudes Ouest de coordonnées 7°15' et 8°05' et les latitudes Nord de coordonnées 7°50' et 6°50' (Figure 1). Son cours d'eau principal draine un bassin versant d'une superficie de 4310 km². Ce bassin versant est sous l'influence du régime de montagne dans sa partie supérieure dont le relief est dominé par les montagnes. Le climat très humide (1 600 à 2 500 mm par an) est caractérisé par deux saisons : une longue saison pluvieuse qui dure 8 mois et une saison sèche de 4 mois.

La végétation est presque partout forestière avec différents types tels que la forêt dense, la forêt claire, etc.

Sur le plan géologique, trois unités lithologiques sont rencontrées dans le bassin versant : i) un ensemble granulitique constitué de gneiss occupant la quasi-totalité du bassin versant, ii) un ensemble charnockitique situé au Nord-Est du bassin et iii) un ensemble migmatitique localisé dans la partie Sud du bassin.

Deux types d'aquifères sont utilisés par les populations pour leur besoin en eau : les aquifères superficiels des altérites et les aquifères fracturés qui sont de loin les plus exploités par les populations. Ce sont ces derniers qui seront étudiés dans ce travail en raison de leur étendu régional.

La population de cet hydrosystème est estimée à 600 000 habitants (INS, 2001) avec une densité démographique moyenne de 48 hbts/km² et un taux de croissance estimé à 4,06 %. L'activité principale des populations est l'agriculture et dans une moindre mesure la pêche et l'élevage.

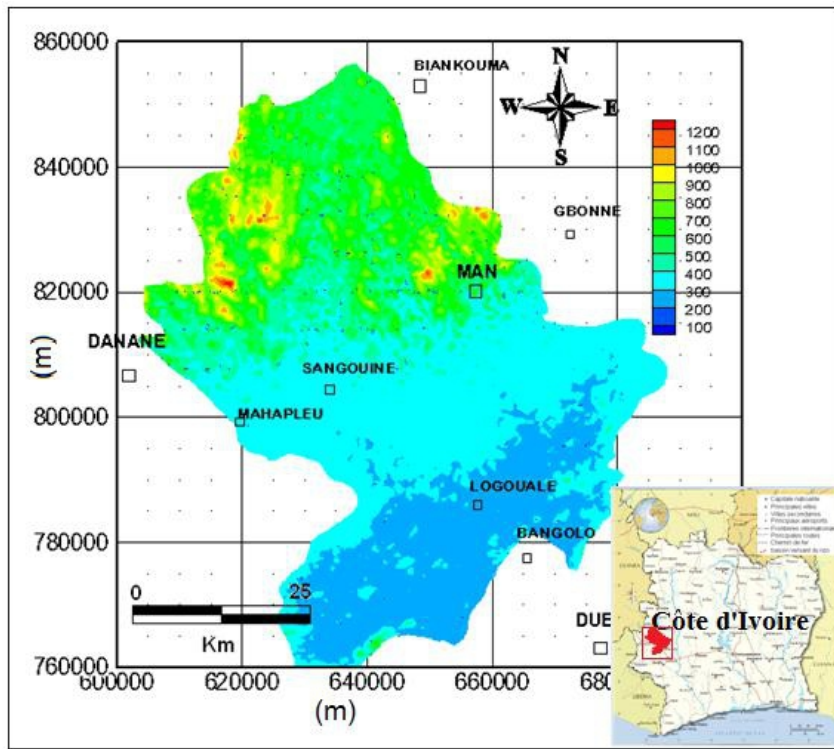


Figure 1. Situation géographique du bassin versant du N'zo

Matériel et méthodes

Matériel

Le matériel de travail est constitué des logiciels ENVI 4.5, ArcMap 9.3 et Avenue™ (Kim *et al.*, 2004). Les cartes d'occupation du sol et du réseau de fractures sont produites avec le logiciel ENVI 4.5. Le traitement du réseau de fractures est réalisé avec le logiciel Avenue™.

ArcMap 9.3 est utilisé pour l'élaboration et l'habillage des cartes thématiques (carte pédologique, carte géologique, etc.). ArcMap 9.3 a servi également à l'extraction de la carte des pentes à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et à l'intégration de l'ensemble des cartes thématiques utilisées pour cette étude

Méthodes

L'identification des zones potentielles de recharge dans le bassin versant du N'zo à Kahin est effectuée en tenant compte des principaux facteurs influençant le processus de recharge en milieu fracturé à savoir : la géologie, les fractures, les types et occupation du sol, les pentes et le réseau de drainage (Krishnamurthy *et al.*, 1996 ; 2000 ; Shaban, 2003 ; Shaban *et*

al., 2006 ; Sener *et al.*, 2005 ; Thakur et Raghuwanshi, 2008 ; Hsin-Fu *et al.*, 2009). Ces facteurs sont cartographiés à partir de plusieurs sources de données notamment la télédétection et les cartographies existantes. Les différentes cartes thématiques générées sont décrites, puis classifiées selon leur aptitude à l'infiltration. Les interactions entre les différentes classes sont évaluées à travers une analyse multicritère.

La méthodologie adoptée comporte globalement deux étapes. La première partie est consacrée à la description des facteurs de contrôle de la recharge des aquifères. La deuxième partie porte sur l'acquisition et la classification de ces facteurs, suivie de l'assignation de poids et de leur intégration.

Facteurs de contrôle de recharge des aquifères

L'interprétation hydrogéologique des facteurs de contrôle de la recharge dans cette étude est consignée dans le Tableau I. A titre d'exemple pour le facteur « lithologie » ; les caractéristiques lithologiques jouant un rôle significatif dans le processus de recharge des aquifères fracturés portent sur la compacité et l'état d'altération de la roche, la présence de diaclase et de joint sur les roches sub-affleurantes ou affleurantes (Krisnamurthy, 1996 ; 2000 ; Bhuiyan, 2009). Ces caractéristiques physiques donnent des informations importantes sur la capacité d'infiltration des formations géologiques. La lithologie est donc prise en compte dans le processus d'identification des zones de recharge en milieu de socle fracturé sous climat tropicale humide où les roches sont beaucoup affectées par l'altération. Une description semblable est effectuée pour les autres facteurs à savoir les fractures, les types et occupation du sol, les pentes et le réseau de drainage.

Tableau I. Description des propriétés hydrogéologiques des différents facteurs

Facteurs	Propriétés hydrogéologiques influençant le potentiel de recharge
La lithologie	Les caractéristiques lithologiques jouant un rôle significatif dans le processus de recharge des aquifères fracturés portent sur la compacité et l'état d'altération de la roche, la présence de diaclase et de joint sur les roches sub-affleurantes ou affleurantes (Krisnamurthy, 1996 ; 2000 ; Bhuiyan <i>et al.</i> , 2009). Ces caractéristiques physiques donnent des informations importantes sur la capacité d'infiltration des formations géologiques.
Fractures	La densité des fractures exprimée en longueur cumulée totale ou en nombre de fractures par unité de surface donne des indications sur le degré de fracturation des roches, permettant ainsi d'identifier les zones hautement fracturées qui sont les endroits perméables à travers lesquels l'eau s'infiltrer et parcourt plusieurs dizaines de kilomètres. La cartographie de la densité de fracturation est par conséquent très utile dans l'identification des zones potentielles de recharge en milieu de socle fracturé (Krisnamurthy, 1996 ; 2000 ; Sener <i>et al.</i> , 2005)
Drainage	

<p>Occupation du Sol</p>	<p>En hydrogéologie, il est bien connu que, plus le réseau de drainage est dense, plus le ruissellement est important et par conséquent il y a moins d'eau disponible pour la recharge des aquifères. Cependant, cette conception sur le réseau hydrographique s'est avérée erronée dans certains cas (Shaban, 2003 ; 2006). A titre d'exemple, dans les formations rocheuses très connues pour leur aptitude à la recharge, notamment les calcaires dolomitiques karstifiés, la densité du réseau hydrographique a un caractère original. Dans ce type de milieu, la densité du réseau de drainage est attribuée à la présence de roches compétentes fracturées qui crée un certain nombre de voies d'écoulement. En milieu de socle cristallin sous climat tropical humide, la corrélation entre densité de drainage et perméabilité des formations géologiques a été évoquée par Edet (1998). Selon cet auteur une forte densité de drainage en milieu de socle fracturé indique une grande perméabilité de la lithologie, qui est elle-même contrôlée par la nature et le degré de fracturation des roches sous-adjacentes ou affleurantes. A l'ouest de la Côte d'Ivoire les études effectuées par Faillat (1986) indiquent également une forte corrélation entre le réseau hydrographique et les accidents régionaux. Dans cette étude la densité du réseau de drainage est considérée comme indicateur de perméabilité. Le réseau de drainage a été utilisé comme critère d'évaluation des propriétés de recharge des aquifères fracturé par de nombreux auteurs (Sener, 2005 ; Shaban, 2006 ; Hsin-Fu 2007 ; Krishnamurphy ; 1996 ; 2000)</p>
<p>Type de Sol/Epaisseur de sol</p>	<p>L'occupation du sol désigne un grand nombre de paramètres présents à la surface du sol qui influence la recharge. Les plus importants sur le plan hydrogéologique sont la couverture végétale et les surfaces imperméables. Les surfaces imperméables (bâtiments, routes, etc) retardent considérablement le processus de recharge (Bou Kheir <i>et al.</i>, 2003). La couverture végétale, par contre améliore la recharge, car elle favorise le confinement de l'eau dans le sol empêchant ainsi l'évaporation directe.</p>
<p>Pentes</p>	<p>La pénétration de l'eau dans les couches souterraines profondes dépend du type et de l'épaisseur des sols. Lorsque la teneur en argile est élevée, les sols sont favorables plutôt à la rétention de l'eau en surface qu'à l'infiltration. Par ailleurs, si ces sols sont riches en éléments sableux, le temps de percolation est contrôlé par leur épaisseur (Rodhe et Bockgard 2006 ; Gleeson, 2009).</p> <p>Les pentes sont inversement proportionnelles au potentiel de recharge des aquifères. Lorsque les pentes sont fortes, le ruissellement des eaux est accéléré ce qui entraîne une diminution considérable de l'eau disponible pour la percolation. A l'inverse les conditions de pentes faibles sont favorables à l'accumulation et à l'infiltration des eaux (Krishnamurthy <i>et al.</i>, 1996 ; 2000)</p>

Acquisition et classification des données

Lithologie

La lithologie du bassin versant du N'zo est cartographiée à partir d'une carte géologique existante à l'échelle de 1/200 000. De manière générale la lithologie est constituée de trois principaux ensembles géologiques (Figure 3) : 1) un ensemble granulitique constitué de gneiss occupant la quasi-totalité du bassin versant ; 2) un ensemble charnockitique apparaissant sous forme d'intrusions, et 3) un ensemble migmatitique occupant la partie sud. Les caractéristiques physiques et l'interprétation hydrogéologique de ces ensembles géologiques sont consignées dans le Tableau II

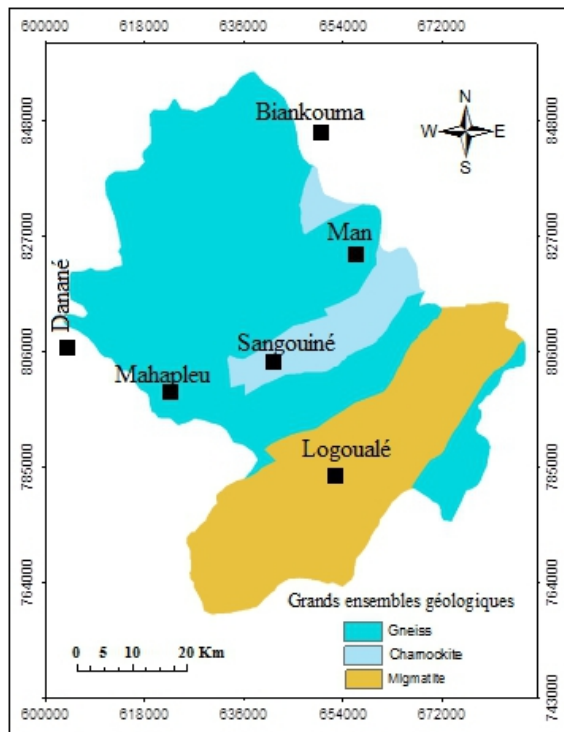


Figure 3. Unités lithologiques

Tableau II. Classification hydrogéologique de la lithologie en fonction des caractéristiques physiques

Lithologie	Description physique	Propriété hydrogéologique (aptitude à l'infiltration)
Gneiss	Les gneiss sont affectés par de nombreuses fractures qui sont observables sur des affleurements rocheux de taille variable allant du mètre au kilomètre et de formes très diverses : dalles, boules et chaos de blocs, "dos de baleine", dômes, inselbergs, pointements rocheux et escaliers (Géomines, 1982). Par ailleurs les logs de forages indiquent la présence et la proximité en surface de l'arène grenue sur ces unités géologiques (Géomines, 1982)	Très bonne
Charnockite	Les charnockites sont plus compactes que les gneiss et contiennent très peu d'arènes grenues (Géomines, 1982). Les charnockites sont aussi très affectés par les fractures mais le fait qu'ils n'ont pas d'arènes grenues, les rendent moins favorables à l'infiltration et à la circulation de l'eau dans les couches souterraines contrairement aux gneiss	Bonne
Migmatite	Les migmatites sont très déformées et présentent un aspect lité. Les plus fortes épaisseurs de latérite et d'argile se rencontrent au niveau de ces roches. La puissance de la latérite est d'environ 6 m qui surmonte une épaisse couche d'argile dépassant les 8 m. L'épaisseur totale des altérations atteint 18 m en moyenne (Géomines, 1982). Cette épaisseur importante d'altération qui est constituée essentiellement d'argile, rend les migmatites moins favorables à l'infiltration et à la circulation de l'eau dans les couches souterraines comparativement aux gneiss et aux charnockites.	Mauvaise

Fractures

La carte du réseau de fractures est issue d'une carte linéamentaire détaillée. Cette dernière est produite à partir d'une image Radar de type RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) fournie par le Radarsat-1 avec une résolution de 50 m et datant de 2001. Les images radars ont l'avantage de pouvoir détecter les linéaments multi-kilométriques contrairement aux images optiques (Rudant *et al.*, 1994 ; Tonyé *et al.*, 1998). L'image employée pour ce travail est déjà rectifiée géométriquement et géoréférencée à l'acquisition. Ainsi les traitements effectués se résument principalement en deux étapes. La première étape consiste à réduire le chatoiement qui est responsable de l'apparence bruitée de l'image. Les effets du chatoiement sont réduits par l'application des filtres tels que Gamma, Lee, Kuan, et Frost disponibles

dans le logiciel ENVI 4.5. La deuxième étape porte sur le rehaussement des discontinuités qui se fait par l'application des filtres directionnels tels que les filtres Laplacien et de Sobel (Rudant *et al.*, 1994 ; Tonyé *et al.*, 1998). Au cours de cette étude ce sont les filtres directionnels de Sobel qui ont été appliqués. Ces filtres sont également disponibles dans le logiciel ENVI 4.5 et leur utilisation a permis une extraction manuelle des différents linéaments. Cette opération aboutit à l'établissement de la carte détaillée des linéaments. Sa validation a nécessité des données de terrain (principalement les débits de forages). La stratégie consiste globalement à évaluer la proximité des forages à gros débits avec des linéaments majeurs (atteignant plusieurs kilomètres de longueur). En outre, les rosaces directionnelles issues respectivement de la carte géologique existante et de la carte linéamentaire produite ont été comparées. Une description complète de cette méthode de validation est disponible dans de nombreux travaux (Jourda, 2005 ; Jourda *et al.*, 2006 Youan Ta, 2008).

La carte validée des fractures a fait l'objet de traitement pour déterminer des paramètres quantifiables telle que la densité de fracturation qui est en rapport avec la perméabilité des aquifères. La production et la visualisation de la carte de densité de fracturation sont effectuées avec le logiciel ArcMap 9.3 (Figure 4). En fonction de la longueur cumulée des fractures sur des mailles de 5x5 km², différentes zones sont identifiées. Elles sont qualifiées de très bonne, bonne, modérée et mauvaise (Tableau III).

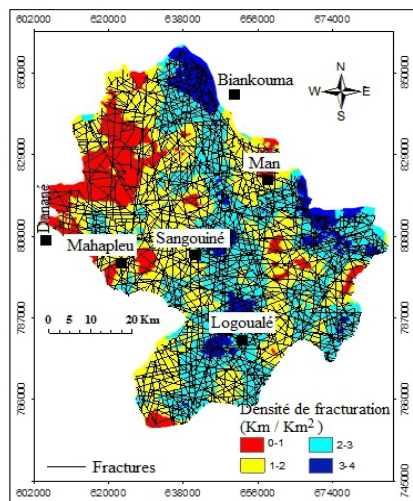


Figure 4. Densité de fracturation

Tableau III. Classification hydrogéologique des domaines en fonction de la densité de fracturation

Domaine	Densité (km/km ²)	Propriété hydrogéologique
1	0,7 - 1	Très bonne
2	0,5 - 0,7	Bonne
3	0,3 - 0,5	Modérée
4	0 - 0,3	Mauvaise

Réseau de drainage

Le réseau de drainage de la zone d'étude est extrait d'une carte topographique au 1/200 000. L'évaluation des propriétés hydrogéologiques de ce réseau de drainage est effectuée à partir d'une étude de densité qui est en rapport avec la perméabilité. La cartographie et la visualisation de la carte de densité du réseau de drainage sont effectuées avec le logiciel ArcMap 9.3 (Figure 5). En fonction de la densité du réseau de drainage sur des mailles de 5x5 km², les zones identifiées sont qualifiées de : très bonne, bonne, modérée et mauvaise (Tableau IV).

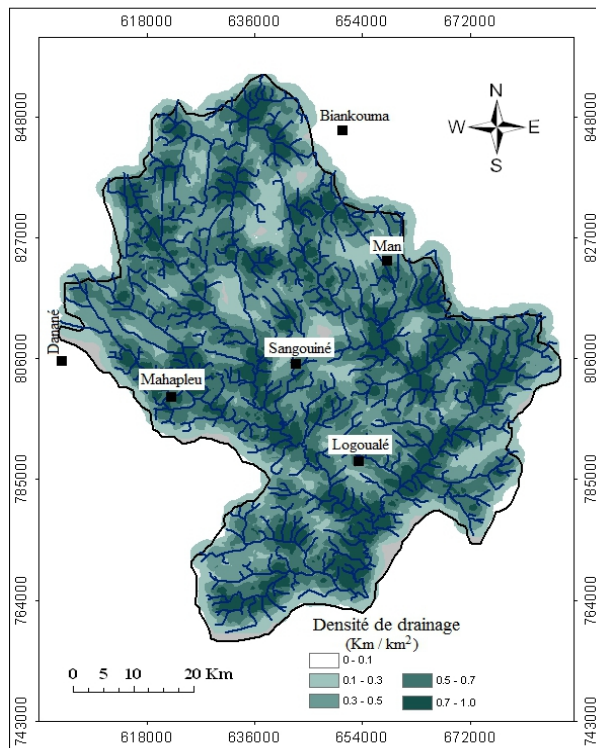


Figure 5. Réseau hydrographique

Tableau IV. Classification des domaines en fonction de la densité du drainage

Domaine	Densité (km/km ²)	Propriété hydrogéologique
1	0,7 - 1	Très bonne
2	0,5 - 0,7	Bonne
3	0,3 - 0,5	Modérée
4	0 - 0,3	Mauvaise

Occupation du sol

L’occupation du sol qui illustre les unités paysagiques du bassin versant du N’zo a été produite à partir d’une image satellitaire Landsat ETM+ datant de 2008. Le type de traitement appliqué à cette image est la classification supervisée avec l’algorithme de maximum de vraisemblance, disponible dans le logiciel Envi 4.5.

Cinq types d’occupation du sol ont été cartographiés dans la zone d’étude (Figure 6): i) forêt dense ; ii) forêt claire ; iii) cultures; iv) sols-nus_zones-habitées et v) eau. L’eau désigne les cours d’eau tels que les rivières, fleuves etc. L’interprétation hydrogéologique de ces classes d’occupation du sol est consignée dans le Tableau V.

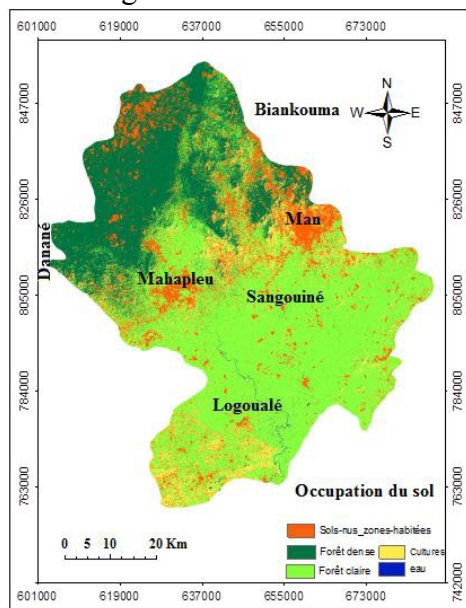


Figure 6. Occupation du sol

Tableau V. Classification hydrogéologique des types d’occupation du sol

Unités	Description	Propriété hydrogéologique
Forêt dense	La forêt dense favorise l’infiltration de par le confinement de l’eau dans la zone végétale. Cependant une grande partie de cette eau est	Bonne

	perdue par évapotranspiration, son rôle est donc limité dans le processus de recharge des aquifères	
Forêt claire	Cette unité est caractérisée par une forte dispersion de la couverture végétale, elle est plus favorable au processus de recharge des aquifères en raison d'une perte limitée de l'eau par évapotranspiration	Très bonne
Cultures	Les cultures lorsqu'elles ne sont pas intensives améliorent la recharge des aquifères en raison de la perte limitée par évapotranspiration. Dans la zone d'étude, les cultures sont très dispersées, ces zones sont donc favorables aux processus de recharge de même que la forêt claire.	Très bonne
Sols-nus_ zones_habités	Cette unité représente les surfaces imperméables (routes, habitats, zones industrielles, affleurements, etc.) qui retardent considérablement la recharge des aquifères en raison de la prépondérance du ruissellement.	Mauvaise
eau	Cette unité représente les cours d'eau permanents (rivières et fleuves), ces cours d'eau alimentent les aquifères (en fonction des saisons).	Excellente

Types et épaisseur de sol

Les sols du bassin versant ont été cartographiés à partir d'une carte pédologique existante au 1/500 000 qui est la seule disponible dans la zone d'étude. Les épaisseurs de ces sols sont décrites en s'appuyant sur la notice explicative de la carte (Perraud, 1971). Quatre types de sol ont été identifiés dans la zone d'étude : i) sols remaniés sur migmatites; ii) sols de plaines alluviales; iii) sols typiques et remaniés ; iv) sols remaniés et rajeunis (Figure 7). La description granulométrique et l'interprétation hydrogéologique de ces sols sont consignées dans le Tableau VI.

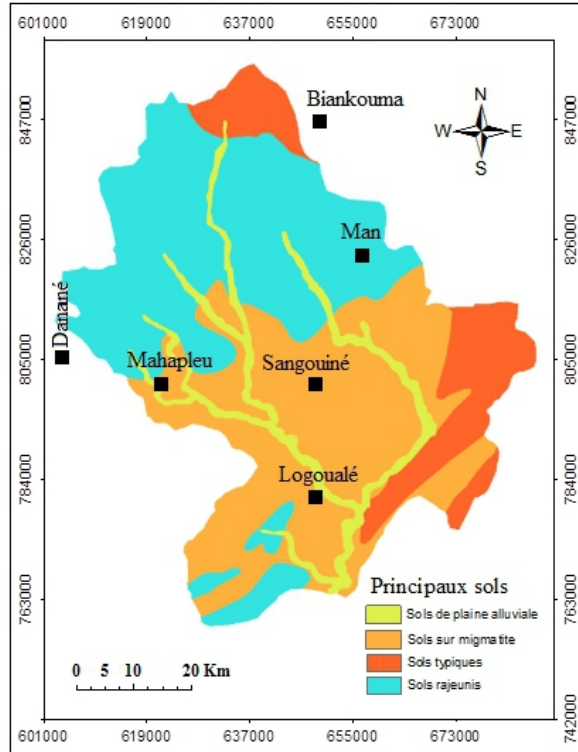


Figure 7. Type de sol

Tableau VI. Classification hydrogéologique des types de sol

Unités	Description	Propriété hydrogéologique
sols de plaines alluviales	Cette unité se présente sous forme d'un cordon longeant les cours d'eau (Figure 7). Du point de vue granulométrique, ces sols sont très riches en sables et limons, et pauvres en argiles, ce qui leur confère une grande aptitude à la percolation	excellente
Sols remaniés et rajeunis	Cette unité est caractéristique des zones de montagne. Elle est peu profonde, et riche en sable et limon sur tout le long du profil. Toutefois, le pourcentage en sable est moins important que celui des sols des plaines alluviales sur tout le profil.	très bonne
Sols typiques et remaniés	Cette unité est relativement peu profonde et très sableux en surface. En profondeur, ils sont successivement sablo-argileux et argilo-sableux. A la différence des sols remaniés rajeunis, ils sont peu riches en éléments grossiers à la base du profil.	Bonne
Sols remaniés	Cette unité est la plus profonde des sols rencontrés	

sur migmatite	dans le bassin versant. Du point de vue granulométrique cette unité est caractérisée par la présence d'un horizon d'accumulation en argile dont le pourcentage dépasse 60 % aux alentours de 2-3 m de profondeur avant de décroître relativement en profondeur.	Mauvaise
---------------	---	----------

Pentes

Les pentes sont déduites du MNT avec une résolution de 90 m. Il est acquis en format SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) et est disponible sur le site « ftp:// eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa' ». Les pentes sont calculées avec le logiciel ArcMap 9.3 et elles sont exprimées en degré. Elles ont été regroupées en cinq classes (Figure 8). L'interprétation hydrogéologique de ces classes est consignée dans le Tableau VII.

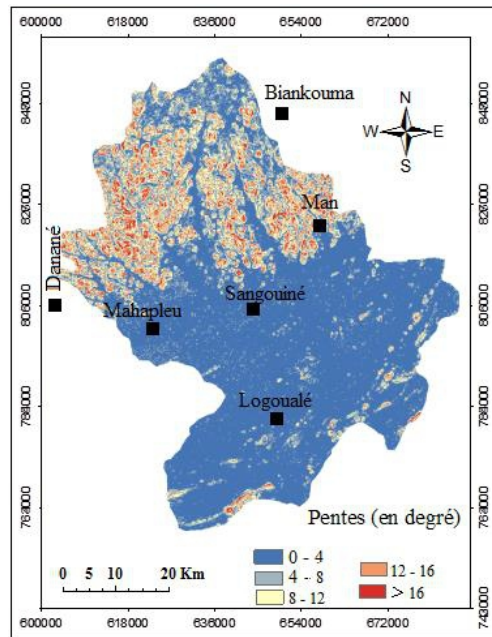


Figure 8. Pentes

Tableau VII. Classification hydrogéologique des pentes

Classe d'intervalle (en degré)	Propriété hydrogéologique
0 - 4	Excellente
4 - 8	Très bonne
8 - 12	Bonne
12 - 16	Modérée
>16	Mauvaise

Traitement et intégration des facteurs de contrôle de la recharge

Les facteurs contributifs à la définition des zones potentielles de recharge sont analysés sous forme de cartes thématiques. Dans un premier temps, une classification relative interne est effectuée au niveau de chaque facteur. Cette classification est basée sur l'interprétation hydrogéologique ou l'aptitude d'infiltration des différentes unités cartographiques et un poids (allant de 1 à 10) est affectée à chaque unité ou classe (Tableau VIII). Dans un second temps, un coefficient est affecté à chaque facteur en fonction de l'importance sur les autres (Tableau VIII). En effet, les facteurs mis en œuvre, notamment la lithologie, les types et occupation du sol, les fractures, le drainage et les pentes n'ont pas le même degré d'influence sur la recharge. Il y a des facteurs qui ont plus d'influence sur la recharge que d'autres. La Figure 2 illustre le schéma conceptuel des interactions existant entre les facteurs dans un hydrosystème (Shaban, 2003 ; Hsin-Fu *et al.*, 2009). Sur ce schéma, on note deux types de relation : les relations majeures (en trait plein) et les relations mineures (en tireté). Lorsque la relation entre le premier et le second facteur est de type majeur, on affecte au premier facteur un coefficient de 1, dans le cas contraire c'est-à-dire lorsque la nature de la relation est de type mineur, un coefficient de 0,5 lui est affecté. Ainsi, le coefficient total affecté à chaque facteur se présente comme suit :

- 1) Lithologie : 3 relations majeures et 1 relation mineur ($3 \times 1 + 1 \times 0,5$), ce qui donne 3,5 ;
- 2) Linéaments : 2 relations majeurs (2×1), ce qui donne 2 ;
- 3) Type de sol : 1 relation majeure (1×1) et 3 relations mineures ($3 \times 0,5$), ce qui donne 2,5 ;
- 4) Occupation du sol : 1 relation majeure (1×1) et 3 relations mineures ($3 \times 0,5$), ce qui donne 2,5 ;
- 5) Pente : 1 relation majeure (1×1) et 1 relation mineure ($1 \times 0,5$), ce qui donne 1,5 ;
- 6) Drainage : 1 relation majeure (1×1) et 2 relations mineures ($2 \times 0,5$), ce qui donne 2.

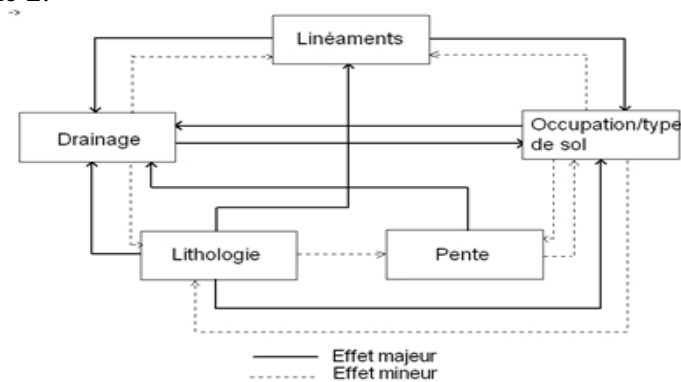


Figure 2. Schéma des interactions entre les facteurs (Shaban *et al.*, 2006, modifié)

Le Tableau VIII résume les poids et les coefficients d'interaction attribués aux différentes classes définies. Ainsi, les facteurs ayant une grande aptitude d'infiltration se distinguent par des poids totaux élevés

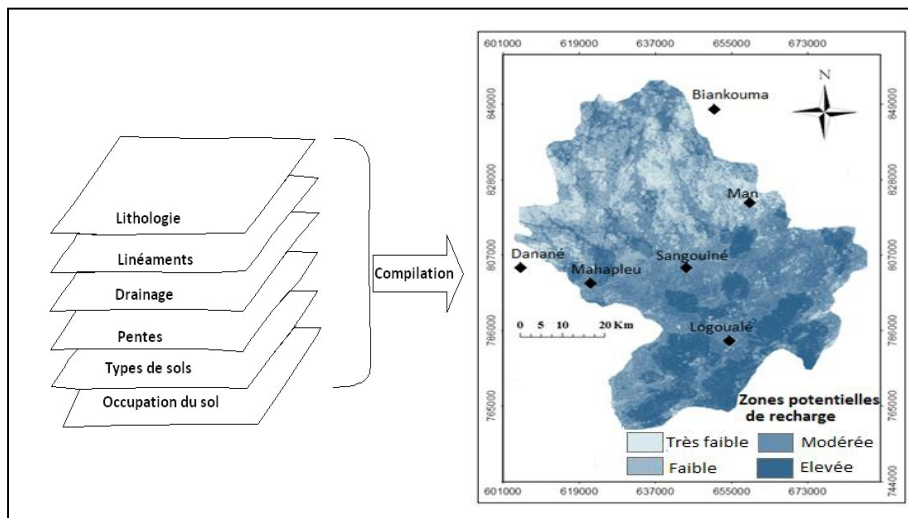
Tableau VIII : Pondération des cartes thématiques en fonction de leur propriété hydrogéologique

Facteurs	Sous classes (des facteurs)	Echelle de description	Poids des sous Classes (a)	Coef de corrélation (b)	Poids total (a x b)
Fractures	1,6-2,4 (km ²)	Excellent	10	2	20
	1,2-1,6	Très bon	8		16
	0,8-1,2	Bon	6,5		13
	0,4-0,8	Modéré	3		6
	0-0,4	Faible	3		6
Drainage	0,6-1 (km ²)	Excellent	10	2	20
	0,4-0,6	Très bon	8		16
	0,2-0,4	bon	6.5		13
	0,1-0,2	Modéré	2,5		5
	0-0,1	Faible	1		2
Pentes	0-4	Excellent	10	1,5	15
	4-9	Bon	6,5		10
	9-16	Faible	2,5		4
	16-23	Faible	2,5		4
	23-60	Faible	2,5		4
Lithologie	Gneiss	Excellent	10	3,5	35
	Charnockites	modéré	4		14
	Migmatites	Faible	2		7
Occupation du sol	Eau/cours d'eau	Excellent	10	2,5	25
	Zones-cultivées	Très bon	7		18
	Forêt claire	Bon	5,5		14
	Forêt dense	Modéré	4,5		12
	Sols-nus_zones-habitées	Faible	2,5		6
Type de sol	sols de plaine alluviale	Excellent	10	2,5	25
	Sols remaniés et rajeunis	très bon	8		20
	Sols typiques et remaniés	Bon	6		15
	Sols remaniés sur migmatite	Faible	2,5		6

Résultats

Carte de synthèse

La Figure 9 montre la carte de synthèse élaborée après l'intégration des cartes thématiques. Les zones potentielles d'infiltration ou de recharge identifiées dans le bassin versant du N'zo sont classées selon leur importance. Elles varient de élevée à très faible. Les zones potentielles de recharge élevée apparaissent majoritairement au sud et au centre du bassin versant avec quelques zones disséminées visibles au nord montagneux. Ces zones représentent environ 20 % de la superficie globale et caractérisent les endroits du bassin où le taux d'infiltration pourrait être élevé en cas de pluies. Elles désignent également les zones de transmission rapide des contaminants de la surface vers l'aquifère. Ces zones doivent être donc protégées dans le cadre d'une gestion durable des ressources en eau. À l'opposé, les zones potentielles de recharge très faible et faible sont localisées majoritairement au nord et au centre-nord du bassin versant. Quelques zones disséminées apparaissent au sud et au centre. Ces endroits représentent environ 35 % de la superficie totale du bassin. Enfin, les zones potentielles de recharge modérée qui occupent 45 % de la superficie totale apparaissent sous formes disséminées à travers l'ensemble du bassin versant avec une forte concentration au centre et au sud. Les infiltrations dans ces endroits sont susceptibles d'être moyennes.



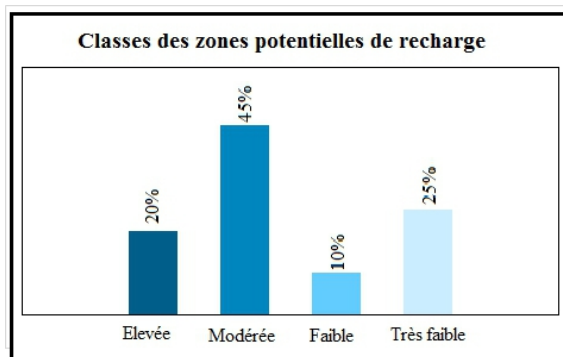


Figure 9. Carte de synthèse des zones potentielles de recharge du bassin versant du N'zo

Discussion

Contribution et limite de la télédétection et des SIG à l'identification des zones de recharge

La télédétection permet d'obtenir diverses sources de données sous formes de cartes thématiques qui sont indispensables à la caractérisation des zones de recharge à l'échelle d'un grand bassin versant. Nous avons entre autres les cartes d'occupation du sol, les cartes de pentes, les cartes du réseau de drainage et les cartes de fractures. La diversité des données nécessite leur intégration dans un SIG. La télédétection et les SIG se sont avérés efficace dans l'évaluation du potentiel de recharge des aquifères fracturés dans de nombreuses études hydrologiques à l'échelle régionale (Salama *et al.*, 1994 ; Shaban *et al.*, 2006 ; Hsin-Fu *et al.*, 2009). Cette approche a aussi l'avantage d'avoir les coûts faibles pour les études portant sur des vastes superficies allant de plusieurs centaines de km² à quelques milliers de km², comparativement aux méthodes expérimentales dont les coûts sont très élevés pour des surfaces limitées (ex : méthodes isotopiques, hydrochimiques, hydrauliques, etc.). Toutefois, l'usage de certains types de données de télédétection tels que les linéaments, qui sont considérés comme les expressions des fractures et des accidents géologiques (Lattman, 1958 ; O'Leary *et al.*, 1976 ; Lillesand et Kiefer, 1989 ; Mabee *et al.*, 1990), est beaucoup controversé dans la littérature. En effet, les linéaments sont habituellement cartographiés à partir des photographies aériennes et/ou des images satellitaires où ils sont représentés par des structures linéaires ou curvilignes. Certains hydrogéologues estiment que seulement 30 % ou moins des linéaments observés sur une image sont considérés être au même endroit avec la même orientation par différents analystes (Podwysoki, 1974 ; Mabee *et al.*, 1990). Le nombre de linéaments observés dépend en général des méthodes d'interprétation et de l'expérience de l'opérateur. On se refera aux travaux de Sander (2007) pour une description complète des limites de l'usage des linéaments. Cependant, la cartographie des linéaments est

soutenable, lorsque ces linéaments sont analysés de manière supplémentaire avec les données géologiques et les données de terrain (Mabee, *et al.*, 1994; Sander *et al.*, 1997; Tam *et al.*, 2004). L'usage des linéaments en hydrogéologie a connu de nombreuses évolutions et son domaine d'application ne cesse de croître. Par exemple, en Côte d'Ivoire, les linéaments ont été employés dans le processus de localisation des ressources en eau souterraine dans différents endroits du pays (Savané *et al.*, 1995; Jourda *et al.*, 2006 ; Youan Ta, 2008).

L'utilisation des SIG dans l'intégration de diverses sources de données connaît aussi des limites. La principale difficulté réside dans la définition des limites de classes et des poids qui sont assignées aux différents paramètres entrant dans la réalisation du SIG. Le choix des limites de classe s'opère le plus souvent en fonction de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement (Jourda *et al.*, 2006). Il faut par ailleurs noter que les limites des différentes classes définies pour les critères et les indicateurs ne doivent pas être perçues comme des barrières tangibles mais plutôt comme des zones de transition entre les différentes classes. Ce même jugement est fait lors de l'assignation des côtes aux différentes classes définies.

Validation de la carte des zones potentielles de recharge

La carte des zones potentielles de recharge produite dans la présente étude n'a pas été validée par manque de données, donc elle est à prendre avec beaucoup de réserves. Néanmoins cette étude reste une approche dans la susceptibilité à la cartographie des zones de recharge. Cette approche est généralisable si les zones potentielles de recharge identifiées sont validées. Plusieurs méthodes de validation pourraient être appliquées. Nous avons entre autres les méthodes isotopiques et hydrochimiques. La méthode isotopique a été appliquée par Assoma *et al.*, 2012 au sud-est de la Côte d'Ivoire pour valider la carte de recharge produite à partir des techniques spatiales. Notons par ailleurs que la validation des zones potentielles de recharge peut se faire raisonnablement aux moyens des outils numériques notamment la calibration d'un modèle hydrologique avec les observations disponibles dans le bassin versant (ex : niveaux piézométriques ; températures ; traceurs chimiques). Toutefois l'application des méthodes numériques est très limitée en raison de l'existence de nombreuses incertitudes liées à la conceptualisation du milieu naturel et aux données utilisées dans la calibration (Anderson et Woessner, 1992 ; Reilly et Harbaugh, 2004)

Conclusion

Les zones potentielles de recharge des aquifères ont été identifiées dans la présente étude selon une méthode simple basée sur les données cartographiques fournies par la télédétection et les SIG. Ce modèle est très pratique pour l'étude des grands bassins versants situés en Afrique subsaharienne caractérisés par la rareté des données hydrogéologiques et hydrodynamiques. Dans le présent travail, ce modèle a permis de fournir de manière qualitative des informations préliminaires importantes sur la distribution spatiale de la recharge des aquifères fracturés dans le bassin versant du N'zô à Kahin situé à l'ouest de la Côte d'Ivoire. La superficie des zones potentielles de recharge élevée représente environ 20 % de la superficie totale du bassin versant. La répartition spatiale de ces zones n'est pas cependant homogène. Elles sont localisées majoritairement au sud et au centre. Elles apparaissent de manière fragmentée au nord du bassin versant. Ces zones de recharge formellement identifiées à partir des techniques spatiales doivent être protégées dans le cadre d'une gestion durable des ressources en eau, car elles représentent les aires de recharge rapide des aquifères régionaux et aussi les zones de transmission des polluants. À l'opposé, les zones potentielles de recharge très faible et faible sont localisées majoritairement au nord et au centre-nord du bassin versant. Ces endroits représentent environ 35 % de la superficie totale du bassin. Enfin, les zones potentielles de recharge modérée qui occupent 45 % de la superficie sont visibles à travers l'ensemble du bassin.

Les résultats de cette étude sont perfectibles en validant la carte de distribution spatiale des zones potentielles de recharge. Cette validation pourrait se faire soit par des méthodes expérimentales telles que l'isotopie ou l'hydrochimie, soit à travers la calibration d'un modèle numérique

References:

1. Aeschbach-Hertig, W., P. Schlosser, M. Stute, H. J. Simpson, A. Ludin et J. F. Clark (1998). A $^3\text{H}/^3\text{He}$ study of groundwater flow in a fractured bedrock aquifer, *Ground Water*, 36, pp 661-669
2. 661-669
3. Allison, G. B. (1988), A review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge, in *Estimation of natural groundwater recharge*, edited by I. Simmers, pp. 49-72, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Netherlands.
4. Anderson M.P. et Woessner, W.W. (1992). Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. *Academic Press*, San Diego, 381 p.
5. Assoma, T.V., Adiaffi, B. et Koudou, A., 2012. Contribution of Remote Sensing, Multicriteria Analysis and GIS for Mapping

- Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. American Journal of Scientific Research, 80 : 112-125.
6. Bhuiyan C., Ramesh P. Singh Flügel W. A. (2009). Modelling of ground water recharge potential in the hard-rock Aravalli terrain, India: a GIS approach. *Environ Earth Sci* (2009) 59:929–938.
 7. Bou Kheir R, Shaban A, Girard M-C, Khawlie M, Abdallah C (2003). Caractérisation morpho-pédologique des zones karstiques du Liban sensibilité des sols à l'érosion hydrique.
 8. *Sécheresse* 14:4
 9. Cook, P. G. et N. I. Robinson (2002). Estimating groundwater recharge in fractured rock from
 10. environmental 3H and 36Cl, Clare Valley, South Australia. *Water Resources Research*, 38, doi:10.1029/2001WR000772
 11. Cook, P. G., S. Lamontagne, D. Berhane, et J. F. Clark (2006). Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, Southeastern Australia, using dissolved gas tracers 222Rn and
 12. SF6. *Water Resources Research*, 42, doi:10.1029/2006WR004921
 13. Degallier R. (1977). Détermination des paramètres hydrodynamique de la nappe souterraine
 14. du bassin versant de Korhogo, d'après les variations de son niveau piézométrique. Sect. III –
 15. Hydrogéologie – *Géologie de l'ingénieur*, sér. II n° 3 et 4, 107 p.
 16. Edet AE, Okereke CS, Teme SC, Esu EO (1998). Application of mote sensing data to groundwater exploration: a case study of the Cross River State, southeastern Nigeria. *Hydrogeology Journal* 6(3):394–404
 17. French, H., and A. Binley (2004). Snowmelt infiltration: monitoring temporal and spatial variability using time-lapse electrical resistivity, *Journal of Hydrology*, 297, pp174-186.
 18. Gburek, W. J., and G. J. Folmar (1999), A ground water recharge field study: site characterization and initial results, *Hydrological processes*, 13, 2813-2831.
 19. Géomines (1982). *Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise*. Ministère
 20. des travaux publics et des transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, République de Côte
 21. d'Ivoire, carte de Man, Cahier n° 24, 30 p.
 22. Gleeson T. (2009). *Groundwater recharge, flow and discharge in large crystalline watershed*. PhD Thesis, Civil Engineering Department, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada
 23. pp. 9-45

24. Greenbaum D. (1985). Review of remote sensing applications to groundwater exploration in basement and regolith. *Brit Geol Surv Rep OD 85* (8), 36 p
25. Hardcastle K.C. (1995). Photolineament factor: a new computer-aided method for remotely sensing the degree to which bedrock is fractured. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 61 (6), pp.739–747.
26. Hayashi, M., G. van der Kamp, and R. Schmidt (2003). Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions, *Journal of Hydrology*, 270, pp 214-229.
27. Healy, R., and P. Cook (2002), Using groundwater levels to estimate recharge, *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
28. Heppner, C., J. Nimmo, G. Folmar, W. Gburek, and D. Risser (2007). Multiple-methods investigation of recharge at a humid-region fractured rock site, Pennsylvania, USA, *Hydrogeology Journal*, 15, 915-927.
29. Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, Kuo-Chin Hsu, Po-Sun Chang (2009). GIS for assessment of groundwater recharge potential zone. *Environ Geol* (2009) 58: 185-195
30. INS – Institut National de la Statistique (2001). *Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) 1998*. Données socio-démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités, région des Montagnes, vol. III, t. 1, 27 p.
31. Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et du Concept de l'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse d'Etat, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 430 p.
32. Jourda, J.P.R., Saley, M.B., Djagoua, E.V., Kouamé, K.J., Biemi, J. & Razack, M., 2006. Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, 4 : 339-357.
33. Kim G.B. Lee J.Y. et Lee K.K. (2004). Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and AvenueTM scripts. *Computers & Geosciences*, 30, pp. 1117-1126
34. Krishnamurthy J, Venkatesa Kumar N, Jayaraman V, Manivel M (1996). An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. *Int J Remote Sensing* 7:1867–1884

36. Krishnamurthy J, Arul Mani, Jayaraman V, and M Manive (2000). Groundwater resources
37. development in hard rock terrain - an approach using remote sensing and GIS techniques.
38. JAG Volume 2 - Issue ¾
39. Lattman L.H. (1958). Technique of Mapping Geologic Fracture Traces and Lineaments on Aerial Photographs, Photogrammetric Engineering, 24: pp. 568-576.
40. Lerner DN, Issar AS, Simmers I (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. *IAH Int Contrib Hydrogeol 8. Heinz Heise*, Hannover, 345 pp
41. Lerner, D. N. (1997), Groundwater recharge, in *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*, edited by O. M. Saether and P. de Caritat, pp. 109-150, Balkema, Rotterdam.
42. Lillesand T. M. and Kiefer R. W. (1989). Remote sensing and image interpretation. *2nd Edition, John Wiley & sons Ed.*, New York, pp. 650-651
43. Mabee S.B., Hardcastle K.C., et Wise D.U. (1990). Correlation of Lineaments and Bedrock Fracture Fabric: Implications for Regional Fractured-Bedrock Aquifer Studies, Preliminary Results from Georgetown, Maine, Proc. FOCUS Conf , on Eastern Reg Groundwater Issues,
44. (3): pp.283-297
45. Mabee S.B., Hardcastle K.C. et Wise D.U. (1994). A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Ground Water* 32 (6), pp.884
46. 894
47. O'Leary D.W., Friedman J.D., and Fohn H.A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed
48. ne\v standards for old terms. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, pp.1463-1469.
49. Perraud A. (1971). Les sols de Côte d'Ivoire. pp. 269-391. In *Le milieu naturel en Côte d'Ivoire. Mém. ORSTOM*, France, n°50, 391 p.
50. Podwysocki M.H. (1979). An analysis of fracture trace patterns in areas of flat-lying sedimentary rocks for the detection of buried geologic structure (abs). in: Hodgson, R.A.,
51. Praamsma, T. W., K. S. Novakowski, T. K. Kyser, and K. Hall (2009). Using stable isotope
52. and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock
53. aquifer, *Journal of Hydrology*, 366, 35-45

54. Reilly T.E. et Harbaugh A.W. (2004). Guidelines for evaluating ground-water flow models:
55. U.S. Geological Survey *Scientific Investigations Report* 2004-5038, 30 p.
56. Rodhe, A., and N. Bockgard (2006). Groundwater recharge in a hard rock aquifer: a conceptual model including surface-loading effects, *Journal of Hydrology*, 330, 389-401
57. Rudant J.-P., Deroin J.-P. and Polidori L. (1994). Multi-resolution analysis of radar images
58. and its application to lithological and structural mapping: Larzac (southern France). *International journal Remote Sensing*, vol. 15, n° 12, pp. 2451-2468.
59. Salama R, Tapley I, Ishii T, Hawkes G (1994) Identification of areas of recharge and discharge using Landsat-TM satellite imagery and aerial photography mapping techniques.
60. *Journal of Hydrology* 162:119–141
61. Sander P., Minor T. B. et Chesley M.M. (1997). Ground-water exploration based on lineament analysis and reproducibility tests, *Ground Water*, 35, pp.888-894.
62. Sander, P. (2007). Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations, *Hydrogeology Journal*, 15, pp.71-74.
63. Sanford W. (2002), Recharge and groundwater models: an overview, *Hydrogeology Journal*.
64. 10 (1), pp. 110-120
65. Saraf AK et Choudhury PR (1998). Integrate remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *Int J Remote Sen* 19: 1825-1841
66. Sarah OT, Marc L, John AW et Maciek WL (2006). Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology Journal* 15: 75–96
67. Savané I., Béné G.B., Gwyn Q.H.J. et Biémi J. (1995). Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. in J. M.
68. Scanlon, B., R. Healy, and P. Cook (2002), Choosing appropriate techniques for quantifying
69. groundwater recharge, *Hydrogeology Journal*, 10, 18-39.
70. Sener E, Davraz A, Ozcelik M (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal* 13:826
71. 834

72. Shaban A (2003). *Etude de l'hydrogéologie du Liban occidental: Utilisation de la télédétection*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 202 pp
73. Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal* 14: 433-443
74. Sharma, M. L., G. A. Gander, and C. G. Hunt (1980), Spatial variability of infiltration in a watershed, *Journal of Hydrology*, 45, 101-122.
75. Simmers I. (1997). Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. IAH Int Contrib Hydrogeol 19, AA Balkema, Rotterdam, 277 p
76. Simmers I. et Jacobus J. de Vries (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol J*, 10, pp. 5–17.
77. Solomon, D. K., S. L. Schiff, R. J. Poreda, and W. B. Clarke (1993), A validation of the $^3\text{H}/^3\text{He}$ method for determining groundwater recharge, *Water Resources Research*, 29, 2951-2962.
78. 2962.
79. Tam V.T., De Smedt F., Batelaan O., et Dassargues A. (2004). Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam, *Hydrogeol. J.*, 12, pp. 662-673
80. Thakur G. S. et Raghuwanshi . R. S (2008). Perspect and Assessment of Groundwater Resources using Remote Sensing Techniques in and around Choral River Basin, Indore and Khargone Districts, M.P. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 36:217-225
81. Khargone Districts, M.P. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 36:217-225
82. Tonyé E., Ndi N. A. et Akono A. (1998). Evaluation comparative de plusieurs méthodes de réduction du chatouement et de plusieurs méthodes d'analyse de texture pour la classification des images RSO. *Actes 4ème Coll. Afr. Rech. Informat.*, Sénégal, pp. 675-686.
83. réduction du chatouement et de plusieurs méthodes d'analyse de texture pour la classification des images RSO. *Actes 4ème Coll. Afr. Rech. Informat.*, Sénégal, pp. 675-686.
84. Youan Ta M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody (Côte d'Ivoire), 236 p.