

CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITES EN EAUX SOUTERRAINES PAR L'UTILISATION DE L'ANALYSE MULICRITERE ET LES SIG : CAS DU DISTRICT DU DENGUELE (NORD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Pinatibi Hyann

Coulibaly Naga, Maître assistant

Coulibaly Talnan Jean Honoré, Maître assistant

Savane Issiaka, Professeur titulaire

Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire

Abstract

Fresh water availability in rural areas of Côte d'Ivoire is a key factor in economic development, improvement of people's living conditions and keeping them in rural areas. The Denguélé district which is one of the driest areas of the country, experiences frequently the departure of its young population. These young people who constitute the working population leave their areas because they are short of economic equipment. The aim of this study was the mapping of groundwater potential so that population will be supplied with enough water of good quality. The adopted methodology consisted of three steps. The first step consisted on mapping the different criteria related to groundwater study using SRTM and Landsat data, water points and hydro-climate data, the second one dealt with the weighting of criteria using multicriteria analysis (MCA) and the third step consisted to realize water availability, accessibility and potentiality maps.

Keywords: Multicriteria analysis (MCA), GIS, Fractures, drainage, Côte d'Ivoire

Résumé

L'accès à l'eau potable, notamment dans les zones rurales de la Côte d'Ivoire en général, particulièrement dans la partie nord constitue un facteur primordial dans le développement économique, l'amélioration des conditions de vie des populations et leur maintien en place. Le district du Denguélé qui se trouve dans l'une des zones les plus sèches du pays est beaucoup victime de l'exode de sa population la plus jeune. En effet, le départ de ces bras

valides est dû à l'insuffisance des infrastructures économique dans cette partie du pays. La présente étude a eu pour objectif de cartographier les potentialités en eau souterraine de la zone d'étude afin de fournir de l'eau de bonne qualité et en quantité suffisante aux populations. La méthodologie adoptée pour la conduire s'est résumée en trois étapes. Dans un premier temps, il a été réalisé le choix et la normalisation des différents facteurs liés à l'étude des eaux souterraines à l'aide d'image SRTM et Landsat, de données de forages et de données hydro-climatiques. Ensuite la pondération et la combinaison de ces facteurs ont été effectuées grâce à l'analyse multicritères. Enfin, les cartes de disponibilité, d'accessibilité et de potentialité en eau souterraine de la zone d'étude ont été produites.

Mots-clés : Analyse Multicritère, SIG, Fractures, Drainage, Côte d'Ivoire

Introduction

L'eau est une ressource essentielle, aux besoins fondamentaux de l'homme et son environnement. Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités. A travers le monde, 70 % de l'eau souterraine exploitée est utilisée pour l'irrigation (Fornés et al., 2005). En effet, la gestion de l'eau souterraine est un axe de recherche assez exploité. Ainsi nous avons des exemples de travaux effectués aux Etats Unis, en Espagne, en Inde et Côte d'Ivoire (Kepfield, 1993 ; Limas et al., 2005 ; Birkenholtz, 2009 ; Kanohin, 2010 ; Mangoua et al., 2014) .Ces différents travaux ont abordés le problème de l'accessibilité à l'eau potable.

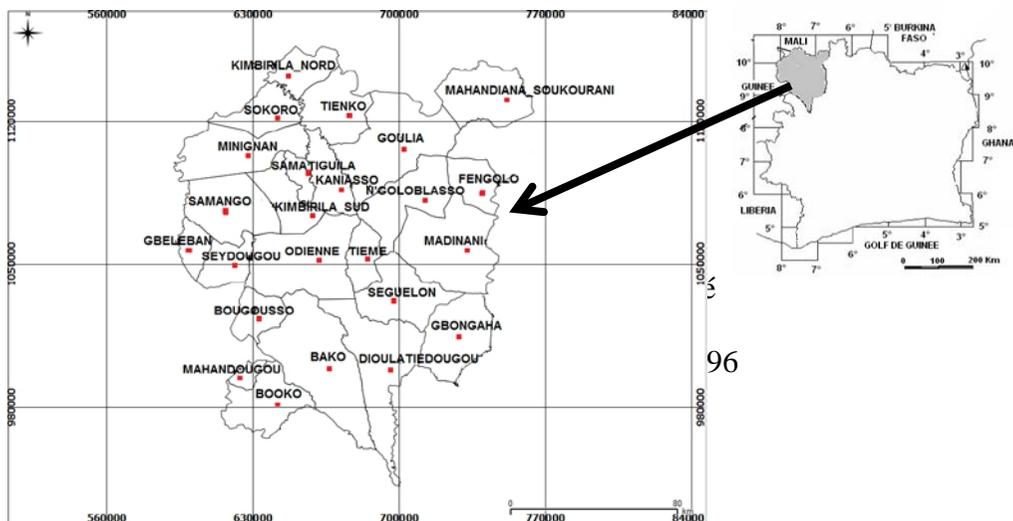
La question de l'eau souterraine engendre beaucoup de problèmes. Par exemple, l'accès à cette ressource devient de plus en plus difficile, particulièrement dans le socle cristallin où l'eau se trouve dans les fractures. En Côte d'Ivoire, le socle cristallin représente 97% des formations hydrogéologiques (Jourda et al., 2006 ; Doumouya et al., 2012), en plus de la difficile accessibilité et exploitabilité, la ressource en eau souterraine peut être exposée au phénomène de la pollution due aux intenses activités anthropiques. A cet effet de nombreuses méthodes ont été utilisées pour cartographier la vulnérabilité des aquifères (Aller et al.,1987; Foster,1987 ; Van Stempvoort et al.,1993 ; Goldscheider et al.,2000 ; Vias et al. , 2006). En Côte d'Ivoire, les prospections hydrogéologiques menées par les méthodes traditionnelles ont montré leurs limites car il s'est produit le tarissement de plusieurs ouvrages dans le nord du pays. Dans le but de collecter des informations fiables et nécessaires à la prospection hydrogéologique, de nouvelles méthodologies sont utilisées. Parmi celles-ci existe l'utilisation des données d'observation de la terre, des systèmes d'information géographique et de l'analyse multicritère pour la mise en place

d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale (SIHRS). En effet, de nombreux travaux utilisant cette méthodologie peuvent être accessibles dans la littérature (Savané, 1997 ; Jourda, 2005 ; (Kanohin, 2010).

La démarche utilisée dans la présente étude consiste en la conception d'un système d'information géographique à partir d'une analyse multicritères. Ce système a pour base des images satellitaires (Landsat ETM+ et SRTM), des données de forage, des données hydro climatique. L'objectif visé est de faciliter la prise de décision dans la fourniture d'eau de qualité aux populations du district.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude (Figure1) se situe entre les Latitudes $8^{\circ}28'30''$ N et $10^{\circ}21'50''$ N et les Longitudes $8^{\circ}07'40''$ W et $6^{\circ}00'15''$ W. Elle couvre environ 20.600 Km^2 pour une population estimée à **312610** habitants. Les précipitations varient entre 1400 et 1600mm et la température moyenne se situe autour de 29° C (Savané, 1997), le relief qui varie entre 200 et 987 m est essentiellement constitué de plateaux, de collines et de montagnes.



2) a décrit et établit une chronologie relative entre les différentes formations. Ainsi, il distingue de la base vers le haut l'antébirrimien, le birrimien et le tarkwaïen. Les différentes études menées dans la région ont permis d'établir un schéma représenté par une série de sillons volcano-sédimentaires, jalonnés par des massifs granitiques et gneissiques concordants et traversés par de petits massifs discordants. Cet ensemble s'intègre aux formations éburnéennes.

La synthèse des travaux réalisés sur la zone par savané (Savane, 1997), met en évidence la répartition suivante : (1) Les granites à biotite d’extension générale occupent 42 % de la superficie ; (2) Les migmatites (anciennes et récentes) 30% de la superficie ; (3) Les granites à biotites homogènes , les granites à deux micas et granodiorites occupent 11% ; (4) Les métasédiments et métavulcanites représentent 5% ; (5) Le gneiss représente 12% de la superficie du district (Figure2).

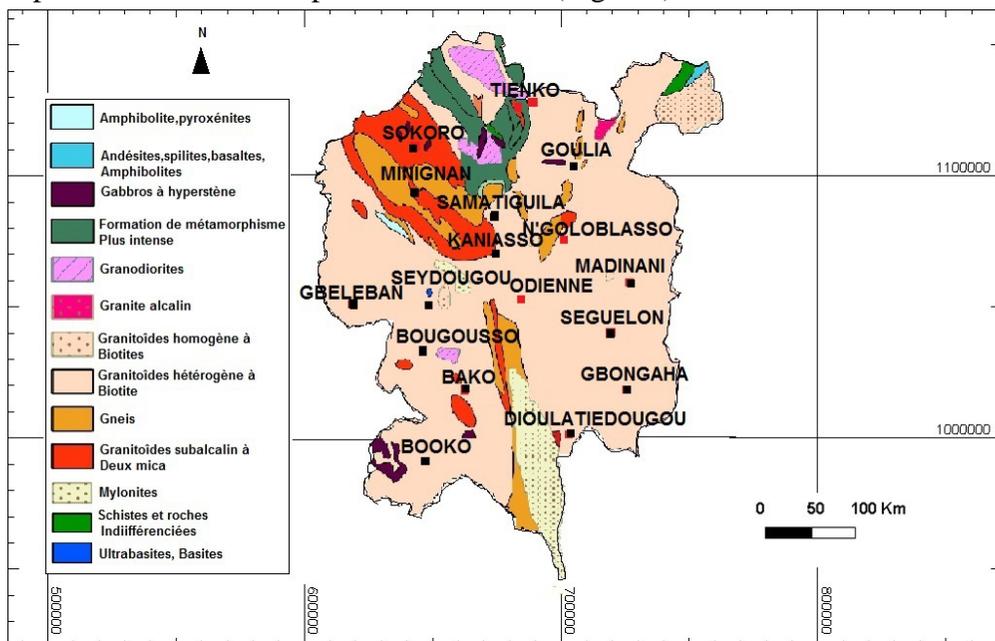


Figure2 : Carte géologique du district du Denguélé

Matériel et Méthodes

Matériel

Dans le cadre de ce travail, il été utilisés des données de 574 forages datant de la période 1955-2000 et fournis par la DHH (Direction de l’hydraulique humaine), des données hydro climatiques composées de pluies mensuelles et ETP, allant de la période de 1950 à 2000 et fournis par la SODEXAM (Société d’Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique), des débits des cours d’eau de la période de 1944 à 2000, issus de la station de samatiguila sur le fleuve baoulé et fournis par la DHH. En plus de ces données discrètes, des images SRTM de 30 mètres de résolution et Landsat ETM+ datant de 2000 et couvrant le district du Denguélé, ont été acquises par téléchargement sur le site de l’USGS (United States Geological Survey). Pour le traitement des données, le logiciel grass 6.5 SVN a servi à l’extraction des linéaments et QGIS 2.2 a permis de réaliser les différentes cartes.

Méthodologie

Elaboration des critères de base

Les indicateurs quantitatifs intervenant dans la cartographie des ressources en eau souterraine peuvent être réunis en trois grands groupes (Savané ,1997 ; Saley ,2003 ; Jourda ,2005 ; Jourda et al., 2006 ; Koudou et al., 2010 ; Kanohin, 2010 ; Mangoua et al., 2014). Ce sont la disponibilité, l'exploitabilité et l'accessibilité, leur description est la suivante :

- L'indicateur de disponibilité traduit la notion de l'existence d'un aquifère et constitue la première condition à connaître avant toute autre activité (Savané, 1997). La carte de disponibilité est réalisée à partir de la combinaison de la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération et l'infiltration efficace. Dans le cadre de ce travail, les méthodes suivantes ont été utilisées pour déterminer les paramètres de disponibilité: (1) Le calcul de l'infiltration à partir du bilan hydrologique ; (2) La génération de la carte des pentes à partir des images SRTM ; (3) La détermination des densités de drainage, grâce au réseau hydrographique extrait des images SRTM; (4) L'obtention des densités de fracturation par l'utilisation des fractures extraites des images SRTM et Landsat , à l'aide de la technique des reliefs ombragés (RO) ;(5) L'utilisation des épaisseurs d'altération issus des données de forage fournies par la DHH.

En effet, le calcul de l'infiltration s'est fait grâce à la formule utilisée par (Mahé et al., 1998), dont l'expression est la suivante: $I = P - (ETR + Q)$

Avec I : l'infiltration, P : la précipitation (mm), Q : la lame d'eau ruisselée (mm), ETR : l'évapotranspiration réelle.

La carte des pentes de la zone d'étude a été générée en format raster à partir des images SRTM, La résolution (ou taille du pixel) choisie pour le calcul des pentes est de 30 m.

La densité de drainage a été déterminée à partir du réseau hydrographique extrait des images SRTM. Après l'extraction du réseau hydrographique, la superficie couverte par ce réseau a été maillée par des carrés de 5 Km² . Le nombre total de maille obtenu est de 1200. Ensuite, il a été calculé pour chaque surface élémentaire la densité de drainage. Le calcul a consisté à faire le rapport entre la longueur cumulée de drains pour chaque maille et la superficie de celle-ci. La formule utilisée est : $D_d = \frac{\sum L}{A}$.

Avec D_d : la densité de drainage (km⁻¹), $\sum L$: la longueur cumulée de drains dans chaque unité de surface (en km), A : la superficie de l'unité de surface (km²).

La densité de fracturation a été obtenue à partir de fractures extraites des images SRTM et des images Landsat ETM+ grâce à la méthode des reliefs ombragés (RO). L'algorithme « r.shaded.relief » du logiciel Grass a aidé en cela. Cette méthode permet d'accentuer les changements abrupts

dans la topographie. Le RO est d'un grand atout pour l'interprétation des linéaments. Car il permet de délimiter et même discriminer certains linéaments. Pour la présente étude, 4 couches de reliefs ombragés ont été effectuées. Les 4 couches se distinguent par la provenance de l'éclairage imposée sur le MNT. Les orientations utilisées sont 045°, 135°, 225° et 315° avec une inclinaison de la source par rapport à l'horizon de 30°. L'outil produit une image raster avec des valeurs de 0 (ombragé) à 255 (éclairé). Chaque image avec sa propre orientation permet de faire ressortir les linéaments avec différentes orientations (Hudon-Gagnon, 2010). Ce type de traitement a déjà été utilisé dans des études géologiques, notamment pour des glissements de terrain (Eeckhaut, 2005 ; Kaveh, 2007 ; Hudon-Gagnon, 2010).

La validation des fractures s'est faite à partir de la carte de fracturations issue des travaux de (Savané, 1997). Ils ont été réalisés sur la même zone. Après l'extraction des fractures, il a été procédé au maillage de la superficie couverte par le réseau de fractures par des carrées de 5 Km². Le nombre total de mails obtenus est 1200. Enfin il a été calculé pour chaque surface élémentaire (maille), la densité de fracturation. Le calcul a consisté à la détermination du rapport entre la longueur cumulé de fractures contenues dans la maille et la superficie de la surface de celle-ci.

Enfin, les épaisseurs d'altération ont été obtenues à partir de données de forage du district du denguélé fournies par la DHH.

- L'indicateur d'exploitabilité dépend du débit d'exploitation et du niveau piézométrique de la nappe. Le débit d'exploitation est conditionné par la quantité d'eau dans la réserve souterraine, mais aussi par la rapidité de renouvellement de cette réserve en cas de forte sollicitation (Youan Ta et al., 2011). Les deux paramètres de l'indicateur d'exploitabilité proviennent des données de forage fournis par la DHH.

- L'indicateur d'accessibilité renseigne sur les conditions d'accès à la ressource en eau souterraine. Ces conditions sont considérées comme des facteurs économiques et sociaux car ils favorisent ou non l'accès à la ressource. Les principaux facteurs d'accessibilité sont la profondeur totale et l'indice de succès. La profondeur totale est le paramètre le plus important dans l'indicateur d'accessibilité car il indique la profondeur à forer pour obtenir le débit optimal. De ce fait, il donne des informations sur le coût du forage, celui-ci (coût) étant facturé en fonction du nombre de mètres forés. La profondeur totale a été fournie par les données de forage de la DHH et l'indice de succès a été déterminé par la formule suivante : $a = \frac{100*b}{10}$

Avec a : l'indice de succès (%), b : le débit d'exploitation (m³/h).

L'indice de succès varie de 10 à 100 %.

Normalisation des critères

La normalisation des différents critères s’est faite en tenant compte des études antérieures réalisées (Savané, 1997 ; Jourda, 2005 ; Kanohin, 2012). Ainsi les différents paramètres calculés plus haut ont été vectorisé au format CSV grâce au logiciel QGIS 2.2 . La technique utilisée pour la spatialisation des critères est l’interpolation. Plus précisément, la méthode d’interpolation nommé pondération par distance inverse (IDW) a été utilisée et les surfaces obtenues à la suite de ces opérations ont été catégorisées en cinq classes suivant le tableau I (Tableau I).

Tableau I : Classification et standardisation des critères (Youan Ta et al., 2011)

| Classe | Paramètres | | | | | | | | |
|--------------------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| | P. | I. | D.D. | D.F. | E.A. | P.T. | I.S. | D.E. | |
| Très Faible | | | | | | | | | |
| Faible | 0-1 | 10-25 | <5 | 1-5 | < 10 | 11-25 | 0-20 | 0-1 | 1-5 |
| Moyenne | 1-2 | 25-50 | 5-10 | 5-10 | 10-20 | 25-52 | 20-40 | 1-3 | 5-15 |
| Forte | 2-3 | 50-75 | 10-15 | 10-15 | 20-30 | 52-70 | 40-60 | 3-5 | 15-25 |
| Très Forte | 3-4 | 75-100 | 15-20 | 15-20 | 30-40 | 70-85 | 60-80 | 5-8 | 25-40 |
| | >4 | >100 | >20 | >20 | 40-78 | 85-78 | 80-100 | 8-25 | 40-45 |

P. : la pente, I. : l’infiltration, D.D. : la densité de drainage, D.F. : la densité de fracturation, E.A. : l’épaisseur d’altération, P.T. : la profondeur totale, I.S. : l’indice de succès, D.E. : le débit d’exploitation, N.S. : le niveau statique.

Pondération et combinaison des critères

Elle s’est faite à partir de la méthode des comparaisons par paire développée par (Saaty, 1977 ; El Moorjani ,2003) dans le cadre du processus d’analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process). Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1 (Tableau II). Ainsi la combinaison des facteurs après leur pondération est obtenue par la formule suivante : $S = \sum Wi * Ni$

Avec Wi : le coefficient de pondération du critère d’indice i, Ni : la valeur du critère d’indice i.

$$Wi = \frac{Vpi}{\sum_{i=1}^n Vpi}$$

Avec Vpi le vecteur propre du critère d’indice i.

$$Vpi = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Ni}$$

Une fois que les couches des facteurs d’appréciation ont été établis (normalisation des critères), et leur coefficient de pondération déterminé (pondération des critères), Il est aisé de les combiner (combinaison des critères). Ainsi la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l’épaisseur d’altération et la recharge ont été déclassifiés en quatre classes : la classe Mauvaise, la classe Médiocre, la classe Bonne et la classe

Excellente. Ensuite, ils ont été combinées à l'aide d'une addition de couche (addition par calcul matricielle de couche raster) pour obtenir la carte de disponibilité. Le même processus a été utilisé pour la profondeur totale et l'indice de succès afin d'obtenir la carte d'accessibilité. De la même manière le débit d'exploitation et le niveau statique ont permis d'obtenir la carte d'exploitabilité, ces trois cartes (carte de disponibilité, carte d'accessibilité et carte d'exploitabilité) combinées ont abouti à la carte des zones potentielles d'implantations des points d'eau. Les différentes opérations ont été réalisées à l'aide du logiciel QGIS 2.2.

Tableau II : Attribution des poids aux différents paramètres

| Carte de | Critères | Poids | Total |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|
| Disponibilité | Pente | 0,5 | |
| | Recharge | 0,25 | |
| | Drainage | 0,13 | 1 |
| | Fracturation | 0,08 | |
| Accessibilité | Epaisseur d'altération | 0,04 | |
| | Profondeur totale | 0,25 | 1 |
| Exploitabilité | Indices de succès | 0,75 | |
| | Débits d'exploitation | 0,25 | 1 |
| | Niveau statique | 0,75 | |

Méthode de validation des cartes thématiques

Pour valider les cartes thématiques (Carte de disponibilité, d'exploitabilité, d'accessibilité et de potentialité), il a été procédé au calcul des incertitudes. Celles-ci (incertitudes) sont été réalisées sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs liés à l'étude des eaux souterraines. En effet, cette méthode a été utilisée par (Doumouya et al., 2012) et l'incertitude est calculée par l'équation suivante : $\Delta \bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$

Avec \bar{X} : l'incertitude sur la moyenne de la série de données, σ : l'écart type de la série de données, m : le nombre de données.

Un facteur d'expansion K est calculé dans le but de déterminer l'intervalle de confiance .En effet, le facteur K permet la définition d'un intervalle de portée suffisante ayant pour but la certification des résultats. Il

s'exprime par l'expression suivante : $K = \frac{|E - \Delta \bar{X}|}{\sigma}$

Avec K : le facteur d'expansion, E : la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de la série.

Le niveau de confiance (NC) des différents paramètres déduit des valeurs de K sont : $K=1$ pour un niveau de confiance de 68%, $K=2$ pour un niveau de confiance de 95% et $K=3$ pour un niveau de confiance de 99%.

Résultats et Discussion

La classe de disponibilité mauvaise (Figure 3) occupe 21 % du district, la médiocre 33 %. Ces classes caractérisent les zones à faible densité de fracturation et à densité de drainage élevée. Elles sont à déconseiller pour l’implantation de forages car un réseau hydrographique dense est défavorable à l’alimentation de la nappe. Les classes de disponibilité bonne 24% et excellente 22 % caractérisent les zones favorables à l’implantation des forages. Elles traduisent une bonne alimentation des nappes. La fracturation y est intense et participe à la recharge de la nappe souterraine.

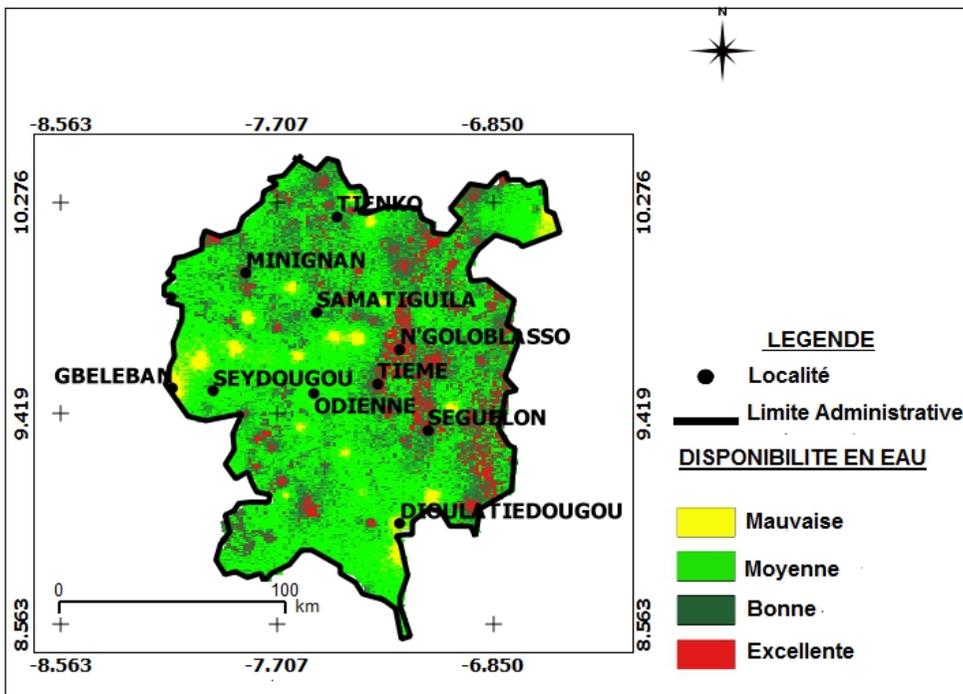


Figure3 : Carte de disponibilité des ressources en eau du district du denguélé

La carte d’accessibilité des ressources en eau souterraine dans le district du Denguélé (Figure4) montre que la bonnes et excellente accessibilité occupent plus de la moitié de la zone soit 55 %.

La classe mauvaise accessibilité en eau représente 20 % du district et elle se localise majoritairement au centre du district, ce sont des domaines caractérisés par des débits très faibles et des profondeurs très élevées comprises entre 90 m et 98.

La classe d’accessibilité médiocre représente 25 % du district, elle est beaucoup visible également au centre et au nord de la zone, plus précisément dans les localités de Samatiguila, Kaniasso et Odienné.

La classe de bonne accessibilité occupe 30 % de la superficie de la zone d'étude, elle est caractérisée par les ouvrages de profondeurs généralement faibles et à fortes probabilité de succès (> 60%).

Enfin, La classe d'excellente accessibilité occupe 25 % de la superficie du district, cette classe est équitablement répartie entre le nord à Kimbirila sud, le sud à Dioulatiédougou, l'ouest et l'est .Elle représente des zones marquées par une excellente accessibilité qui sont disséminé sur toutes l'étendu de la région. Cependant, elles sont plus visibles au nord et au sud dans les localités de Dioulatiédougou, Bako et Tienko.

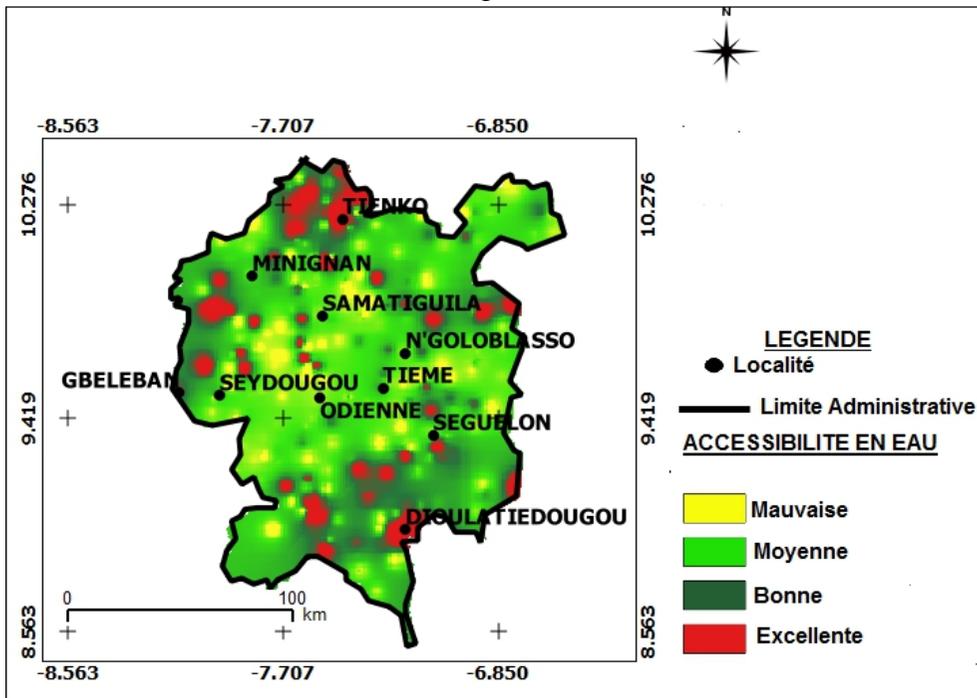


Figure4 : Carte d'accessibilité aux ressources en eau du district du denguélé

L'analyse de la carte d'exploitabilité (Figure5) révèle que les zones d'exploitabilité mauvaise occupent 15% du territoire. Elles regroupent les secteurs où les ressources ne sont généralement pas exploitables bien qu'elles soient probablement disponibles. En effet, ces territoires sont caractérisées par des débits d'exploitation très faibles (< 1 m³/h) et un niveau statique très profond (> 40 m). Elles constituent le seuil de survie des ouvrages de captage et la poche la plus importante se localise dans la partie Nord Est du district du Denguélé.

La classe à exploitabilité médiocre a une proportion d'occupation estimée à 25 %, elle exprime une relative difficulté dans l'exploitation des ressources souterraines et se retrouve dans tous les secteurs de la zone

d'étude. Cette classe regroupe les zones qui constituent le domaine favorable à l'hydraulique villageoise.

La classe à bonne exploitabilité est caractérisée par des débits moyens et forts accompagnés de niveaux statiques moins profonds (10-15 m), elles occupent 40 % de la zone d'étude. Ces localités constituent les domaines favorables à l'approvisionnement en eau potable de centres secondaires et aussi pour l'hydraulique urbaine.

Enfin, la classe à excellente exploitabilité représente 20 % du district, elle est caractérisée par des débits moyens et forts ($>25\text{m}^3/\text{h}$) et des niveaux statiques moins profonds ($<10\text{ m}$). Ce sont des zones qui se rencontrent dans les localités de Bako, Bougouso, Dioulatiédougou et Kimbirila-sud. Elles constituent également les domaines favorables à l'approvisionnement en eau potable pour les centres secondaires et aussi pour l'hydraulique urbaine, car elles se rencontrent majoritairement dans les zones à bonne exploitabilité.

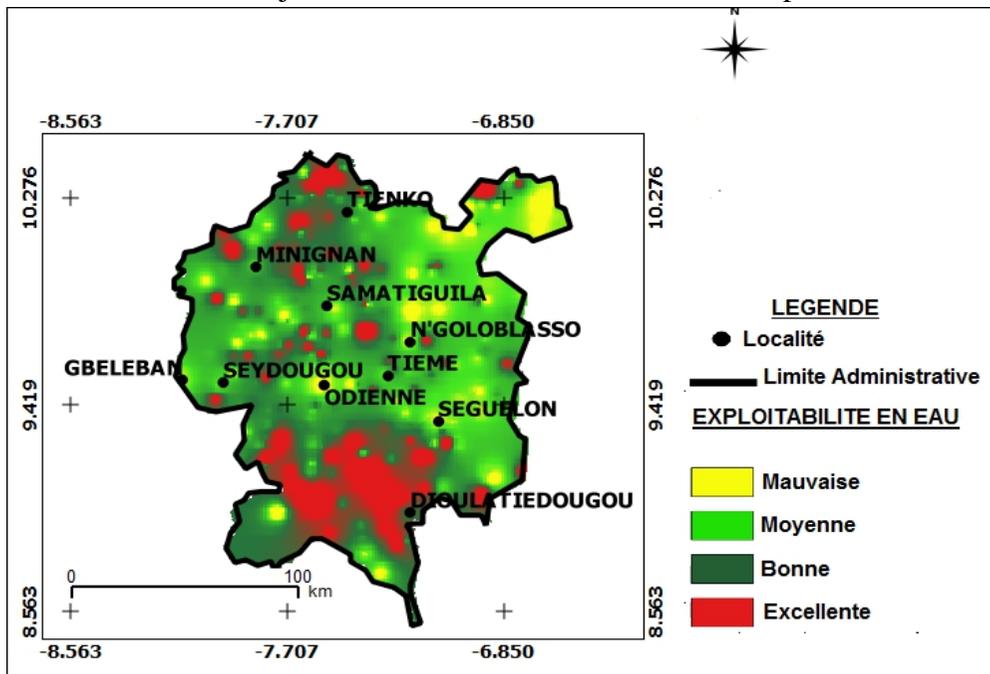


Figure5 : Carte d'exploitabilité des ressources en eau du district du Denguélé

Au niveau de la carte des potentialités (Figure6), les zones de potentialité mauvaise et médiocre occupent respectivement 15% et 40% du domaine d'étude. Ces zones sont présentes au centre et au sud du district, dans les localités de Kaniasso et Minignan, à l'ouest du district, dans les localités de Gbéleban et Seydoukou. Ce sont des zones à densité de fracturation faible car elles sont caractérisées par une recharge médiocre de la nappe cependant, elles sont appropriées à l'implantation des forages dont les débits sont acceptables dans le cadre de l'hydraulique villageoise.

Les zones de potentialité bonne et excellente occupent respectivement 35 % et 10% du domaine d'étude, elles sont présentes sur la quasi-totalité du district du Denguélé. Dans ces zones, les ouvrages sont moins profonds et à succès probable, caractérisées par une densité de fracturation élevée, la ressource en eau y est disponible car une pente relativement faible permet une bonne recharge de la nappe. Elles sont favorables à l'implantation de forage dans le cadre de l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) et des forages à gros débits (hydraulique urbaine).

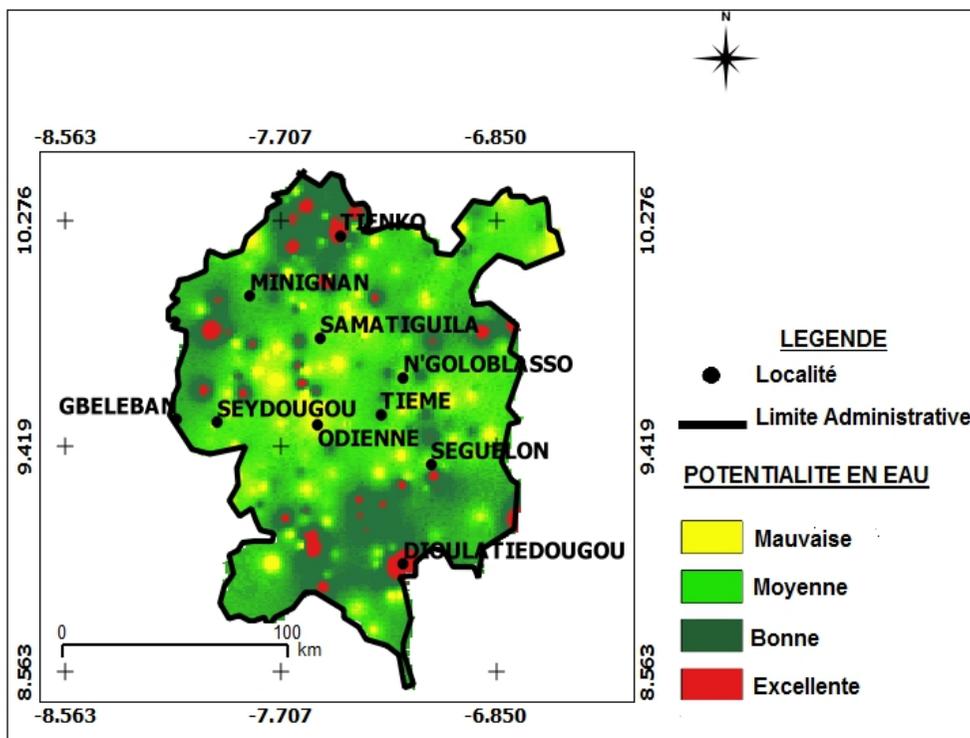


Figure6 : Carte des potentialités en ressources en eau du district du Denguélé

L'analyse des incertitudes calculées sur les paramètres d'évaluation de la disponibilité en eaux, montre que celles-ci (incertitudes) varient entre ± 0.002 et ± 0.344 (Tableau III), cela montre une minimisation des erreurs lors des calculs matricielles pour la réalisation de la carte de disponibilité. Cependant, l'incertitude de l'infiltration bien que minime, est beaucoup plus élevée que celles des quatre autres paramètres. Les niveaux de confiance sont également intéressants, ils représentent 95% pour les densités de fracturation et les épaisseurs d'altération, 99% pour les infiltrations.

Concernant les paramètres d'accessibilité, l'incertitude varie entre ± 0.12 et ± 0.13 pour des intervalles de confiance de 68%. La carte

d'accessibilité a une incertitude de ± 0.013 et un niveau de confiance de 95%.

Les paramètres de la carte d'exploitabilité que sont le débit et le niveau statique, ont respectivement des incertitudes de ± 0.13 et ± 0.15 pour des intervalles de confiances respectifs de 68% et 99%. La carte d'exploitabilité a une incertitude de ± 0.089 et un intervalle de confiance de 99%.

Enfin, la carte des potentialités en eau a une marge d'erreur de ± 0.053 et un niveau de confiance de 95%.

Ces différents chiffres montrent une minimisation des erreurs pendant la réalisation des différentes cartes.

Tableau III : Résultats des critères d'évaluation des indicateurs

| Paramètres | Min. | Max. | Moy. | Ecartype | Incertitude | K | NC(%) |
|---------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|---------------------|----------|-----------|
| Pente | 0,0023 | 5,2 | 0,409 | 0,475 | \pm 0,013 | 1 | 68 |
| Infiltration | 40 | 92 | 74,16 | 12,32 | \pm 0,345 | 1 | 68 |
| Densité f. | 0,01 | 0,54 | 0,228 | 0,093 | \pm 0,0052 | 2 | 95 |
| Densité d. | 0 | 5 | 0,53 | 0,5 | \pm 0,032 | 1 | 68 |
| Epaisseur A. | 1 | 58 | 24,09 | 7,77 | \pm 0,32 | 2 | 95 |
| Disponibilité | 2,88 | 12,9 | 9,63 | 1,57 | \pm 0,045 | 2 | 95 |
| Profond. T. | 6,5 | 92,1 | 35,57 | 20,23 | \pm 0,12 | 1 | 68 |
| Indice S. | 1 | 99 | 33,10 | 2219 | \pm 0,13 | 1 | 68 |
| Accessibilité | 1 | 4,75 | 2,02 | 0,46 | \pm 0,013 | 2 | 95 |
| Débit | 0,1 | 40 | 3,57 | 3,31 | \pm 0,13 | 1 | 68 |
| Niveau S. | 0,7 | 37,4 | 9,02 | 3,64 | \pm 0,15 | 2 | 99 |
| Exploitabilité | 1 | 4,5 | 2,17 | 0,31 | \pm 0,089 | 3 | 99 |
| POTENTIALITE | 4,88 | 19,39 | 13,87 | 1,86 | \pm 0,053 | 2 | 95 |

Densité f. : la densité de fracturation, Densité d. : la densité de drainage, Epaisseur A. : l'épaisseur d'altération, Profond. T : la profondeur totale, Indice S. : l'indice de succès, Niveau S. : le niveau statique.

Cette étude a permis de mettre en exergue une concordance entre l'intensité de la fracturation et les zones à forte potentialité en eau souterraine. En effet, l'intensité de la fracturation sur le district du Denguélé est beaucoup plus visible à l'est c'est-à-dire au niveau des chaînes de montagnes (chaînes de Tiémé etc.). La majeure partie des fractures ont une direction NE-SO, cela est conforme aux travaux de (Savané, 1997) et cette situation se reflète sur la carte de disponibilité en eau souterraine. En effet, la concentration de la classe de disponibilité excellente est importante dans cette partie du district. Les résultats montrent également que le district du Denguélé a des potentialités en eau souterraine estimées excellente et bonne qui représentent respectivement 10% et 35 % de sa superficie.

L'utilisation des SIG et de l'analyse multicritère a abouti à la production des cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité des ressources en eau souterraine. Les méthodes d'analyse multicritère ont été

utilisées par de nombreux auteurs et elles ont permis la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages à gros débits (Savané, 1997 ; Saley, 2003 ; Jourda, 2005 ; Jourda et al., 2006 ; Kaveh et al., 2007). Mais aussi à la sélection de meilleurs sites de stockages de déchets (Roy, 1995 ; El Moorjani, 2003 ; Koumé, 2007). Les SIG et l'analyse multicritère présentent de nombreux atouts car ils apportent une contribution incontestable à la gestion des ressources en eau et les prises de décisions rationnelles. En fait, ces méthodes constituent une pré-prospection qui évite les phases de recherches lourdes, lentes et coûteuses comme l'ont indiqué les travaux de (Langevin, 1991).

Cependant, elles présentent des limites car l'estimation des paramètres manque souvent de précision et cela est dû à l'insuffisance ou l'absence totale de données en certains endroits des zones d'étudiées. Compte tenu de la décennie de guerre qu'a connue le pays, les données ne sont généralement pas disponibles dans les zones « ex assiégées » dont est issu le district et celles qui sont présentes ne sont pas d'actualité, c'est ce qui explique le caractère non récent des données utilisées pour l'étude. Mais, cela n'enlève rien à la pertinence de la méthodologie utilisé.

Conclusion

L'étude des potentialités en eau souterraine dans le district du Denguélé a permis d'évaluer les capacités hydrogéologiques de cette partie de la Côte d'Ivoire par l'évaluation des trois principaux éléments intervenant dans l'étude des eaux souterraines à savoir la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité. La classe bonne est la plus dominante, elle représente pour la disponibilité, l'accessibilité et l'exploitabilité respectivement 30%, 40% et 35% du territoire du district. Ces chiffres montrent des probabilités de succès acceptables pour la prospection hydrogéologique dans cette zone. Comme conséquence, les potentialités en eau bonne et excellente représentent respectivement 35% et 10% du district. Cela montre que 43 % (près de la moitié) du territoire district du Denguélé possède de bonnes conditions hydrogéologiques.

References:

- Biémi, J. (2011). „Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire ”, dans *Revue internationale de géomatique*, 21(1):43-71. doi:10.3166/RIG.21.43-71
- Birkenholtz, T. (2009). „Irrigated landscapes, produced scarcity, and adaptive social institutions”, dans Rajasthan, India. *Ann Assoc Am Geogr* 99:118-137
- Couture, R. (1962). „Note au sujet d'un essai de carte tectonique de la Côte d'Ivoire ”, dans DGPM , Dact. SODEMI, Cout -26p.

- Doumouya, I. Brou, D., Kouassi, I. K., Bachir, S., Jourda, J. P., Savané I. et Biémi, J. (2012). „Modelling of favourable zone for establishment of water points by geographical information system (GIS) multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d’Ivoire)”, dans *Environnemental Earth Sciences*, Doi 10.1007/s12665-012-16622-2.
- El Moorjani, Z. (2003). „Conception d’un système d’information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc) ”, dans *Thèse de doctorat, Université de Genève. Terre et Environnement*, Vol. 42, 300 p,
- Fornés, J.M.A.H et Limas, M.R. (2005). „ The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain”, dans *Water Pol* 7:253-268
- Foster, S. (1987). „ Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, Van Waegeningh HG (eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*”, dans *Committee Hydrol. Res. Hague* pp. 69–86.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. et Hotzl, H. (2000). „ The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers”, dans *Geol.* 46(3):157–166
- Jourda, J.P. (2005). „ Méthodologie d’application des techniques de télédétection et des systèmes d’information géographique à l’étude des aquifères fissurés d’Afrique de l’ouest. Concept de l’Hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d’Ivoire ”, dans *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d’Ivoire*, 429 p,
- Jourda, P., Saley, M. B., Djagoua, E. M., Kouamé, K. J., Biémi, J. et 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”, dans *Revue Internationale de Télédétection*, Vol. 5, n°4, pp 339-357,
- Kanohin, F. (2010). „ Evaluation des ressources en eau de surface et souterraine dans un contexte de variabilité climatique dans la région de daoukro (Nord-est de la côte d’ivoire) ”, dans *Thèse unique de doctorat université Abobo-Adjamé, Abidjan (Côte d’Ivoire)* ,146p
- Kanohin, F., Bachir, S., Aké, G. E. et Savané, I. (2012). „ Apport de la télédétection et des SIG dans l’identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d’Ivoire) ”, dans *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 1 No. 1 Nov., pp. 35-53
- Kaveh, H. F., Deffontaines, B. et Fruneau, B. (2007). „ Apports d’un Système d’Information Géographique et de la télédétection pour l’étude des

mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : Applications à l'Est de l'Île-de-France", dans Revue Française Géotechnique n°120-121, pp. 201-214.

Kepfield, S.S. (1993). „ The "Liquid Gold" rush: groundwater irrigation law", dans Nebraska, 1900-93. Great Plains Quart 13:237-250

Kouamé, K. J. (2007). „Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution", dans Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, 225p,

Koudou, A., Kouamé K.F., Youan ta, M., Saley, M.B., Jourda, J.P. et Biémi, J., (2010). „ Contribution des données ETM+ de LANDSAT, de l'analyse multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire) ", dans Photo-Interprétation European Journal of Applied Remote Sensing, 3-4: 98-115.

Laaribi, A. (2000). „ SIG et analyse multicritère ", dans Hermes Science Publications, 190 Langevin, C., Pernel, F. et Pointet, T. (1991). „ Aide à la décision en matière de prospection hydrogéologique. L'analyse multicritère au service de l'évaluation du potentiel aquifère, en milieu fissuré (granite de Huelgoat, Finistère, France) ", dans Hydrogéologie, n°1, pp. 51-64,

Limas, R. et Martinez-Santos, P. (2005a). „ Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflict", dans J Water Res PJ 131:337-378

Mahé, G., Dessouassi, R., Bandia, C. et Olivry, J.C. (1998). „Comparaison des influences interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du banni à Douna au Mali ", dans International Association of Hydrological Sciences, 252, pp.289-295

Mangoua, M. J., Dibi, B., Koblan, E. W., Douagui, G. A., Kouassi, K. A., Savané I. et Biémi J. (2014). „ Map of potential areas of groundwater by the multi-criteria analysis for the needs for water of the Baya's catchment basin (East of Côte d'Ivoire)", dans academic journals, 6 November, Vol. 9(45), pp. 3319-3329

Saaty, T.L. (1977). „ A scaling method for priorities in hierarchical structures", dans Journal of Mathematical Psychology, 15, pp. 234-281

Roy, B. (1995). „Méthodologie multicritère d'aide à la décision " dans Economica, XXII, Paris, 423 p,

Saley, M.B. (2003). „Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) ", dans Thèse unique de doctorat, université de Cocody, 209 p,

Savané, I. (1997). „ Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord-Ouest de la Côte

- d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale ”, dans Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan- Côte d'Ivoire, 386 p,
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. et Wassenaar, L. (1993). „ Aquifer vulnerability index (AVI): a GI compatible method for groundwater vulnerability mapping Can”, dans *Water Resour. J.* 18:25–37.
- Vias, J.M., Andreo, B., Perles, M.J. , Carrasco, F., Vardillo, I. et Imenez, P. (2006). „ Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in southern Spain”, dans *Hydrogeol. J.* 14:912–925.
- Youan Ta, M. (2008). „ Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique 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) ”, dans unique de doctorat, Université de Cocody, (Côte d'Ivoire) ,237p
- Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.P., Saley, B.M., Adja, M.G., Kouamé, K. et Biémi, J. (2011). „ Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère Cas de Bondoukou (Côte d'Ivoire) ”, dans *Revue internationale degéomatique*,21(1):4371.doi:10.3166/RIG.21.43-7