



**OPTIMISATION DU POSITIONNEMENT DES OUVRAGES
DE CAPTAGE DANS LE DEPARTEMENT DE KATIOLA
(CENTRE-NORD DE LA COTE D'IVOIRE)**

**OPTIMIZATION POSITIONING CATCHMENT WORKS IN THE DEPARTMENT OF
KATIOLA (NORTH CENTRAL IVORY COAST)**

*COULIBALY TALNAN J. H., COULIBALY N., FADIKA V.,
KOUADIO KOFFI C. A., SAVANE I., DEROIN J. P.*

UNA, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Cote d'Ivoire.

ctalnan@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'objectif principal de ce travail de recherche est de montrer comment la télédétection et SIG peuvent contribuer à optimiser l'implantation des ouvrages de captage en zone de socle. L'essentiel des ressources en eau souterraine est contenu dans les aquifères discontinus du socle. L'étude de la fracturation, à partir d'outils efficaces, s'avère être une étape cruciale dans la décision d'implanter des puits et forages en zone de socle. Le processus décisionnel proposé exploite principalement les SIG et les techniques de télédétection pour l'acquisition de données environnementales fiables, afin de faire ressortir des informations de qualité, bases de toute décision de gestion des eaux souterraines. Notre travail présente des concepts permettant l'élaboration d'un système de décision assistée adapté à la conduite des projets de gestion et d'exploitation des eaux souterraines.

Les méthodes d'analyse statistique et géostatistique appliquées aux données ont permis d'obtenir des informations sur les linéaments extraits automatiquement des images d'interférométrie radar et sur les zones hydrogéologiquement productives, afin de prévoir de façon optimale les sites d'implantation de puits et forages à gros débits. Il ressort de ce travail que la télédétection et les SIG facilitent l'implantation des ouvrages en zone de socle.

Mots clés : Télédétection ; outils d'aide à la décision, aquifères, images SRTM

ABSTRACT

The main objective of this research is to show how remote sensing and GIS can help to optimize the implementation of catchment works in base zone. Most of the groundwater resources is contained in the discontinuous aquifers of the base. The study of fracking, using effective tools, proves to be a crucial step in the decision to locate wells and boreholes in base zone. The proposed decision process mainly operates GIS and remote sensing techniques to the acquisition of reliable environmental data, in order to emphasize quality information, bases of any decision to groundwater management. Our work presents concepts for the development of a decision aided system suitable for the conduct of project management and exploitation of groundwater. The methods of statistical analysis and geostatistics applied to data allowed to obtain information on the lineaments automatically extracts from radar interferometry image with hydrogeological productive areas to provide optimally well implantation. It is clear from this work that remote sensing and GIS facilitate the implementation of wells in base zone.

Keywords: Remote sensing; decision-making aid tools; groundwater; SRTM images.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) constitue un apport important dans les politiques de gestion efficace de l'environnement. La précision et la bonne qualité des informations fournies par ces outils les rendent particulièrement performants pour cela (Wade *et al.*, 2008 ; Elloumi *et al.*, 2011). Ils facilitent ainsi la tâche à un décideur en lui fournissant tous les éléments pertinents dans de nombreux domaines comme la topographie, géologie, agriculture, démographie et météorologie (Oufella *et al.*, 2008 ; Koudou *et al.*, 2010). De nombreux travaux scientifiques effectués dans le domaine de l'hydrogéologie en Côte d'Ivoire par les chercheurs tels que Biémi (1992), Savané (1997), Savané et Biémi (1999), Kouamé (1999), Saley (2003), Jourda (2005) et Jourda *et al.* (2006) ont montré la contribution du couple télédétection-SIG dans les investigations hydrogéologiques. L'utilisation conjointe des SIG et de la télédétection par ces derniers a permis ainsi d'identifier des linéaments qui indiquent des zones de faille et de fracture susceptibles de contenir de l'eau souterraine exploitable.

Pour ces hydrogéologues, le choix du site d'implantation d'un ouvrage de captage (puits et forages) productif en zone de socle, comme le département de Katiola, constitue une réelle préoccupation. En effet, 67% des débits rencontrés dans ce département sont faibles, avec une moyenne de $2,86 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Gnamba *et al.*, 2014). Ces faibles débits observés sont souvent imputés aux manques d'études sérieuses avant leur implantation pendant les campagnes d'hydraulique (Gnamba *et al.*, 2014). Les puits et les forages constituent en majorité les sources d'approvisionnement en eaux potables des populations en zones rurales. Ce taux élevé des faibles débits et faibles pourcentages de succès des puits et forages diminue donc la quantité d'eau potable disponible pour ces populations (Coulibaly, 2009a ; Koïta, 2010). L'obtention d'un grand débit pour des ouvrages de captage dépend en grande partie de leur positionnement dont la plus convoitée et la plus propice est celle située sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures kilométriques (Savané, 1997).

La question est donc de savoir comment localiser avec précision les sites propices en vue de positionner de façon optimale les puits et forages. Cette difficulté peut être aplanie par la télédétection et les SIG qui contribuent à optimiser ce positionnement.

Les méthodes basées sur la recherche de fractures pour le repérage de site de forage suscitent plusieurs interrogations. Ce sont notamment la distribution des débits dans le réseau de fracture, la variation de la profondeur dans les formations, la distribution du réseau de fractures suivant la profondeur, le positionnement des ouvrages sur les fractures kilométriques. Toutefois, loin de prétendre résoudre définitivement toutes ces questions, cette étude se veut être une approche méthodologique contributive pour le repérage des zones susceptibles de fournir de l'eau exploitable. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'intérêt de l'élaboration d'un système d'aide à l'optimisation de l'implantation des puits et forages en vue de l'approvisionnement en quantité suffisante d'une eau potable aux populations. Dans cette perspective, est initiée une étude dont le thème est : « Optimisation du positionnement des ouvrages de captage dans le département de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire) ».

L'objectif général de ce travail est de montrer comment la télédétection et les SIG peuvent contribuer à optimiser le positionnement des ouvrages de captage en zone de socle.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Situé dans le Centre-Nord de la Côte d'Ivoire et au Nord de Bouaké, le département de Katiola, zone de notre étude, est à environ 400 km d'Abidjan. Il est compris entre les longitudes 4° et 6° Ouest et les latitudes 8° et 10° Nord, ce qui correspond à la zone UTM 30 Nord. Ses coordonnées dans ce référentiel varient entre 210.000 et 310.000 mètres en longitude et entre 880.000 et 940.000 mètres en latitude. Le département fait partie de la région du Hambol dans le district de la Vallée du Bandama.

Le département de Katiola est situé en zone de socle cristallin. Les formations géologiques du département appartiennent au birimien ou encore paléoprotozoïque (Doumbia *et al.*, 1998). On retrouve une bande de flyschs birimiens bordés au Nord de Katiola et dans la partie Sud-Est du département, par les roches du complexe volcano-sédimentaire, elles-mêmes entourant du granite intrusif. La carte géologique du département (Géomines, 1982) indique la présence de métasédiments et de migmatites à l'Ouest du département, de granites à biotite au Sud. On retrouve également du granite à deux micas, des métavulcanites et des granodiorites.

Le département présente des formations cristallines qui, du point de vue hydrogéologique à l'état sain, possèdent une porosité et une perméabilité très faibles. Cependant, les phénomènes tectoniques et physico-chimiques qui affectent ces roches induisent une porosité et une perméabilité dites secondaires, permettant à ces formations de devenir des aquifères souvent de grande productivité. La présence de 2 types d'aquifères est à noter ; les aquifères d'altérites exploités par des puits modernes ou villageois, les aquifères de fissures et de fractures captés par les forages dans le cadre des programmes d'approvisionnement en eau potable des localités.

MATERIEL

Données

Données SRTM

Pour réaliser cette étude, quatre dalles SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) d'interférométrie radar ont été utilisées (Tableau I). Le choix de ces images satellitales s'est basé sur la disponibilité et le recouvrement total de la

zone d'étude. En outre, ces images ont l'avantage d'être assez claires avec moins d'interférence atmosphérique possible et ont pour source l'United States Geological Survey (USGS). Les données SRTM sont des données altimétriques de la surface du terrain selon un maillage régulier. Parmi les images SRTM disponibles en téléchargement libre, nous avons utilisé les dalles SRTM-3 version 2 fournies par l'USGS en 2004. Leur résolution est de 90 mètres soit 3 arcs secondes, couvrant toute la zone d'étude. Les cartes qui résultent des images SRTM sont de bonne qualité et représentent assez fidèlement la réalité puisque les informations fournies par ces images montrent une vraisemblance avec la réalité de terrain. Ce qui fait des cartes issues de ces images de précieux outils de décision et de gestion.

Dans cette étude, les images SRTM suivantes N07W005 ; N08W005; N07W006 ; N08W006 ont été utilisées. Elles ont été acquises la bande C et X qui émettent dans l'hyperfréquence et peuvent pénétrer dans le sol jusqu'à 1 mètre de profondeur.

Données hydrogéologiques (relevés de puits et forages)

Pour cette étude, nous avons utilisé les données de quatre-vingt-dix (90) puits et forages exécutés dans le département de Katiola. Pour chaque puits et forage, nous avons disposé des informations telles que : les débits, les arrivées d'eau, la profondeur de l'ouvrage, le niveau statique et le type géologique du socle.

Autres données

Nous avons également utilisé des données la carte des limites administratives de la Côte d'Ivoire, fournie par le CNTIG (Comité National de Télédétection et d'Informations Géographiques). Elle a été rédigée en novembre 2011 à la suite du nouveau découpage administratif. Le réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire, fourni par le CNTIG en 2004 et la carte de photo-interprétation de la zone d'étude, fournie par l'ORSTOM en 1995 (aujourd'hui IRD).

Outils informatiques

Un ordinateur pour l'installation des environnements de travail et le stockage de la base de données numériques a été utilisé, ainsi que les logiciels QGIS et R pour la gestion des données, l'analyse, le traitement d'images, l'extraction des linéaments, la production des cartes et des rosaces directionnelles.

METHODES

Méthodes de cartographie des linéaments structuraux et du réseau de fractures

La cartographie des linéaments structuraux et du réseau de fractures de la zone d'étude a été réalisée successivement par le prétraitement des images SRTM d'interférométrie radar, leur traitement pour l'identification et l'extraction des linéaments et enfin, la validation de ces linéaments structuraux.

Les méthodes employées ici sont en conformité avec celles utilisées dans les travaux menés par les chercheurs tels que Chang et Sinha (2007) qui montrent que les images SRTM sont des images radar pouvant servir de base pour l'extraction automatique des linéaments et la cartographie des fractures en milieu de socle. Cela est corroboré par les travaux de Masoud et Koike (2011b), Akamé *et al.* (2013) sur l'analyse et l'extraction des linéaments topographiques détectés automatiquement. Dans ces travaux, ce sont les images SRTM de 90 m de résolution qui ont été utilisées comme sources de données de base pour la détection des linéaments. Les méthodes employées ici, s'appliquent très bien aux images SRTM d'interférométrie radar.

Méthodes de prétraitement des images SRTM

Dans la première phase de notre travail, nous avons procédé au mosaïquage des quatre dalles SRTM de la zone d'étude (Références : N07W005, N07W006, N08W005 et N08W006) en une image unique, à l'extraction de la zone d'étude, au filtrage et rehaussement de l'image mosaïque avant les opérations de traitement proprement dites.

Mosaïquage et extraction de la zone d'étude

L'opération de mosaïquage a été effectuée en utilisant QGIS. Le fichier en sortie est une image unique, géoréférencée couvrant toute la zone d'étude. L'affichage montre que les quatre dalles sont parfaitement juxtaposées. L'extraction de la zone d'étude a été effectuée également avec QGIS. L'opération a consisté en la superposition du Shape file de la zone d'intérêt et la mosaïque et une coupe de la mosaïque obtenue à partir du Shape file.

Filtrage

Le filtrage appliqué ici est dit de type convolutions et morphologie. Le filtre utilisé est celui de Sobel (de matrice 7x7) dans les quatre directions : Nord – Sud (N-S), Nord-Est – Sud-Ouest (NE-SW), Nord-Ouest – Sud-Est (NW-SE) et Est – Ouest (E-W). Selon Kouamé *et al.* (1999), l'application de ce filtre (spatial et directionnel) permet d'accentuer et de mieux faire ressortir les linéaments (rehaussement), afin de les cartographier. Ce type de filtrage a donné de bons résultats dans les travaux de Youan (2008) et de N'guessan *et al.* (2015).

Méthodes d'extraction des linéaments

Pour l'extraction des linéaments structuraux, deux approches méthodologiques sont à considérer selon Kouamé *et al.* (1999). La première consiste à extraire de façon automatique les linéaments par morphologie mathématique et la seconde consiste en une extraction manuelle des linéaments par photo-interprétation (Biémi *et al.*, 1992; Savané, 1997; Kouamé *et al.*, 1999; Saley, 2003).

L'approche méthodologique utilisée ici est la première qui consiste à extraire de façon automatique les linéaments. Cette phase a constitué l'opération majeure du traitement.

A partir de l'image mosaïque prétraitée et par l'utilisation de l'Algorithme de Détection de Segment (LDS), nous avons procédé à l'extraction automatique des linéaments dans les quatre directions (N-S, E-W, NE-SW et NW-SE). Cela a été possible par les méthodes mathématiques d'analyse numérique, incorporées dans les algorithmes du logiciel d'information géographique (LIG) utilisé. L'intérêt de l'utilisation du LDS pour cette opération réside dans sa capacité à extraire automatiquement les linéaments des images (Kocal *et al.*, 2004).

L'algorithme LDS extrait les linéaments à partir de l'image et enregistre les polygones dans un segment de vecteur. Les linéaments extraits sont enregistrés au format Shapefile. Cette opération a été effectuée pour chacune des quatre directions (N-S, E-W, NE-SW et NW-SE), ensuite fusionnées pour obtenir une image unique.

L'extraction automatique des coordonnées des linéaments et l'exportation des données attributaires liées au fichier Shape en dbf (base de données) sont effectuées avec le LIG QGIS. A partir de ces fichiers, quatre champs (X1, Y1,

X2, Y2) sont créés dans la table attributaire (X1 et Y1 représentent les coordonnées du début et X2 et Y2 les coordonnées de fin des linéaments). Le calcul des coordonnées X1, Y1 et X2, Y2 se fait automatiquement avec le LIG QGIS. Après le calcul des coordonnées, les longueurs des linéaments sont extraites automatiquement. Tous les fichiers Shape de chaque direction subissent une fusion en un seul Shapefile. Le fichier .dbf (base de données) associé au Shapefile est importé dans le progiciel R pour l'édition des rosaces directionnelles.

Validation des linéaments

La deuxième phase de la cartographie structurale est la validation des linéaments extraits du traitement et de l'interprétation des images SRTM. Cette phase est indispensable pour juger de la pertinence de la méthode utilisée et conditionne l'utilisation de la carte pour les prospections hydrogéologiques futures. L'opération de validation consiste à supprimer les activités anthropiques, afin de ne laisser que les tracés correspondant effectivement aux linéaments. Or, Koita (2010) a montré dans ses travaux que les images Landsat font ressortir toutes les structures linéaires y compris les activités anthropiques contrairement aux images SRTM (images radar). Cette différence de densité est essentiellement due à la différence de résolution entre les deux types d'image (90 m pour les images SRTM et 30 m pour les images Landsat).

Ce qui signifie que les images SRTM d'interférométrie radar sont, par nature, dépourvues de toutes activités anthropiques (réseau routier, chemin de fer, fils électriques, plantations, etc.).

C'est pourquoi dans cette étude, la validation des linéaments extraits automatiquement a été relativement simple. Le réseau hydrographique, la carte de photo-interprétation et les données de puits et forages réalisés dans la zone ont servi de base pour valider les linéaments (Coulibaly, 2009b). La démarche a consisté, dans un premier temps, en la comparaison entre les linéaments extraits et le réseau hydrographique. Elle a permis d'identifier et de mettre en valeur tous les linéaments parallèles aux segments de cours d'eau rectilignes (Akamé *et al.*, 2013), afin d'établir une corrélation. Une autre validation a été effectuée, dans un second temps, en superposant dans le LIG QGIS, les relevés de puits et forages réalisés dans la zone aux linéaments extraits. Une corrélation établie montre que les puits et forages à débit supérieur ou égale à $5\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ se superposent parfaitement aux linéaments. L'adéquation entre les linéaments extraits des images SRTM, le réseau hydrographique et les puits et forages de la zone, confirme que les linéaments identifiés sont très vraisemblablement

l'analyse géostatistique pour déterminer une structuration spatiale de ces différents paramètres (Coulibaly, 2009b).

L'analyse statistique puis les méthodes géostatistiques ont été appliquées ici aux données de puits et forages afin de comparer et de mettre en évidence l'influence et la corrélation entre les mesures et l'évaluation de la productivité (les débits). L'usage du variogramme a permis de décrire la structure spatiale et d'analyser la corrélation entre les points mesurés quand la distance varie, tandis que le krigeage ordinaire utilisé ici a permis de faire l'estimation et la prévision des débits.

Le progiciel R qui a permis de réaliser ces analyses, de traiter la géostatistique de la productivité, avec la réalisation du variogramme et du krigeage. Pour y parvenir, les données des puits et forages de la zone d'étude ont été tout d'abord saisis et organisées en données tabulaires. Le fichier tabulaire de sortie que nous avons nommé « debit.xls » a été ensuite converti au format texte csv « debit.csv ».

L'utilisation de R pour l'analyse variographique et la prévision des débits par la méthode du krigeage ordinaire, requiert le téléchargement et l'installation préalable de packages de géostatistique tels que : gstat, Rcmdr, sp et geoR. Ces packages sont disponibles en téléchargement libre sur le site internet du CRAN (Comprehensive R Archive Network).

Après avoir chargé le fichier texte « debit.csv » dans l'interface de R par la commande R commander du package Rcmdr : **Données > Importer des données > depuis un fichier texte > debit.csv**, la première phase du traitement a consisté à réaliser le variogramme de la productivité à partir des données sur les débits. Pour ce faire, les données chargées dans l'interface ont été tout d'abord converties en des données spatiales et interpolées par le logiciel. La formule suivante a permis de réaliser le variogramme :

```
g<-gstat(id="debit",formula=debit~1,data=e)
```

```
plot(variogram(g,map=TRUE,cutoff=4000,width=200),threshold=10).
```

La deuxième phase a permis de produire la carte de prévision des débits par la méthode du krigeage ordinaire. Dans cette méthode, qui est la plus utilisée, la moyenne n'est pas connue, mais elle est considérée continue par morceau et la covariance du processus est supposée inexistante. Cette opération a été possible par la formule: **p<-predict(g,model=v.fit,newdata=grd).**

Méthodes de cartographie des sites propices d'implantation des ouvrages

La première approche méthodologique appliquée au prétraitement et au traitement des images SRTM a permis d'extraire les linéaments et d'établir la carte du réseau de fracture. Quant à la seconde approche appliquée au traitement des données de puits et forages, elle a abouti à la carte de prévision et de répartition spatiale des débits.

Ces informations sur le réseau de fractures, la prévision et la répartition spatiale des débits sont intégrées et combinées dans le logiciel d'information géographique QGIS et aboutissent à l'obtention des zones potentielles d'implantation des puits et forages.

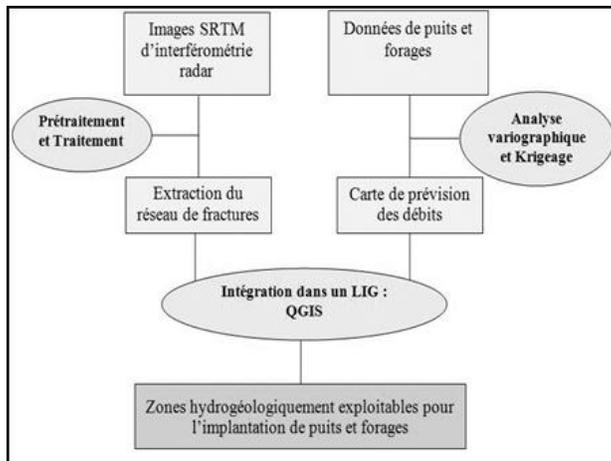


Figure 2 : Synthèse de la démarche méthodologique de l'outil d'aide à la décision

La première étape consiste à charger dans le LIG QGIS, la carte raster de prévision et de répartition des débits, précédemment obtenue par krigeage dans R, par le menu « **ajouter une couche raster** » du LIG. La seconde étape consiste à superposer le Shapefile du réseau de fracture de la zone à la carte de prévision des débits. Le système de coordonnées de projection de chaque couche intégrée devant être les mêmes afin de s'assurer la parfaite superposition des deux couches. La combinaison de ces deux couches dans le LIG, fait apparaître sur une carte unique les zones à forte densité de fracturation superposées aux zones à fort débit exploitable. Cette carte géoréférencée fait ressortir les zones hydrogéologiquement exploitables avec une bonne connaissance de leurs coordonnées géographiques. Elle peut servir à optimiser

l'implantation des puits et forages dans la zone. Au-delà, la méthodologie employée ici peut également servir pour des zones non encore prospectées. La méthodologie employée peut se résumer comme suit (figure 2) :

RESULTATS

Résultats d'extraction des linéaments

L'extraction des linéaments dans les images filtrées laisse apparaître sous forme linéaire ou curvilinéaire une variation de réflectance ou de rétrodiffusion. Les détails linéaires observés révèlent des phénomènes géologiques ou géomorphologiques profonds variés : failles, fractures, contacts géologiques.

La figure 4 présente les linéaments extraits dans les quatre directions : N-S, E-W, NE-SW et NW-SE.

Analyse statistique des linéaments

L'analyse des linéaments, extraits des images SRTM d'interférométrie radar, permet de mettre en évidence les caractéristiques de ces linéaments : fréquence, orientation, nombre, densité et longueur. La carte obtenue, après fusion des quatre directions NS, NE-SW, EW et NW-SE (figure 3), présente 2011 linéaments (résumés dans le tableau I).

Tableau 1 : Nombre de linéaments par direction

Direction	Nombre de linéaments	Pourcentage (%)
N-S	486	24,17
NE-SW	485	24,11
E-W	515	25,61
NW-SE	525	26,11
TOTAL	2011	100

Le tableau I montre que la principale direction de fracturation est NW-SE avec un pourcentage de 26,11% suivie de la direction EW avec 25,61%.

La figure 3 présente la distribution directionnelle des linéaments.

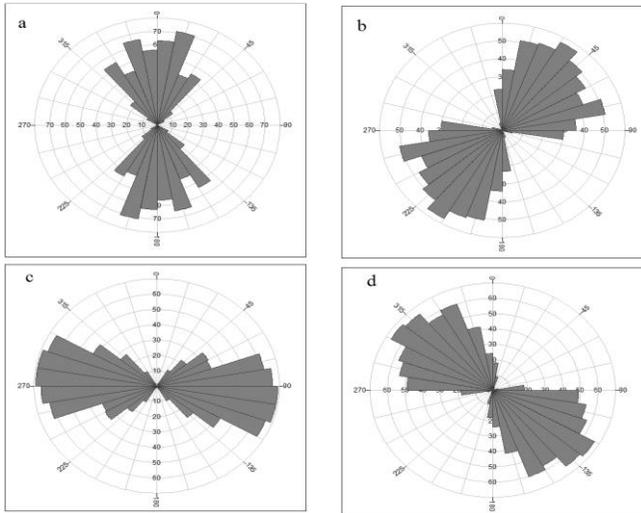


Figure 3 : Fréquence de distribution statistique des linéaments

Les fréquences de distribution statistique des linéaments (figure 3) montrent que les fractures de direction NW-SE sont majoritaires avec plus de 525 linéaments et une fréquence de distribution élevée, suivies par celles de direction EW. Toutefois, l'analyse des rosaces directionnelles de la fracturation dans le département montre que la distribution des familles de fractures est d'une manière générale hétérogène.

Le tableau 2 ci-dessous présente les caractéristiques détaillées de ces linéaments. Les fractures de direction NW-SE avec une longueur comprise entre 2,7 km et 20,194 km et une longueur moyenne de 5,174 km, se positionnent comme les plus longues des quatre directions.

Le résultat obtenu (figure 4) est très intéressant car il est représentatif de la majorité des linéaments présents sur la zone d'étude. Cette figure montre la présence des structures géologiques susceptibles d'influencer l'écoulement des eaux souterraines en direction des nappes de la zone. Ainsi, l'utilisation du couple télédétection-SIG dans ce travail a servi à la mise en évidence, des structures qui contribuent à l'identification des zones d'infiltration des eaux en milieu de socle.

Tableau 2 : Longueur des linéaments par direction

Direction	Longueur (km)		
	Minimum	Maximum	Moyenne
N-S	2,7	17,431	5,175
NE-SW	2,7	17,981	5,085
E-W	2,7	18,545	5,111
NW-SE	2,7	20,194	5,174

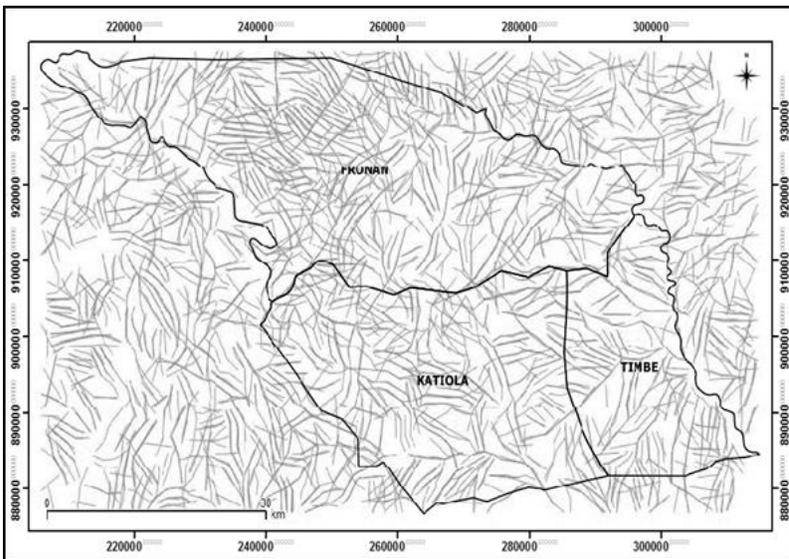


Figure 4 : Linéaments des directions N-S, E-W, NE-SW et NW-SE

Validation des linéaments

Les images SRTM d’interférométrie radar sont par nature dépourvues de toutes activités anthropiques (réseau routier, chemin de fer, fils électriques, limites de plantation, etc.) comparativement aux images Landsat. Or, l’opération de validation consiste à supprimer ces activités anthropiques, afin de ne laisser que les tracés correspondant effectivement aux linéaments. Ainsi, une corrélation établie entre les linéaments extraits, le réseau hydrographique et la carte de photo-interprétation a permis de valider cette carte des linéaments (figure 5).

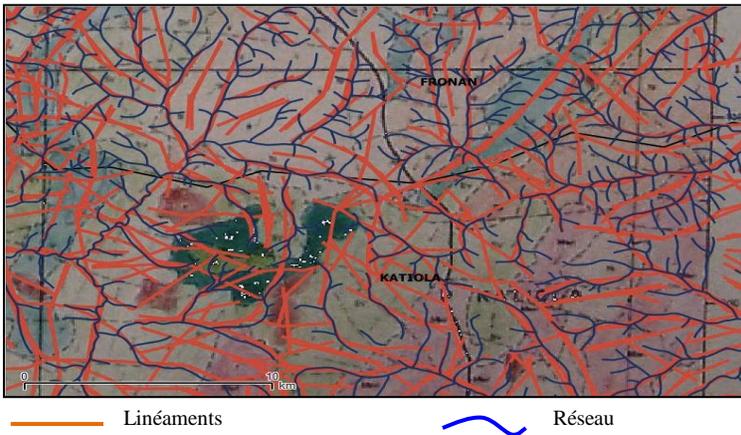


Figure 5 : Corrélation des linéaments avec le réseau hydrographique

Une autre validation a été effectuée en superposant dans QGIS, les relevés de puits et forages réalisés dans la zone aux linéaments extraits. Une corrélation établie montre que les puits et forages à débit supérieur ou égale à $5\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ se superposent parfaitement aux linéaments (figure 6). Ces opérations de validation permettent d'attribuer, à l'ensemble des linéaments retenus, la valeur de fractures.

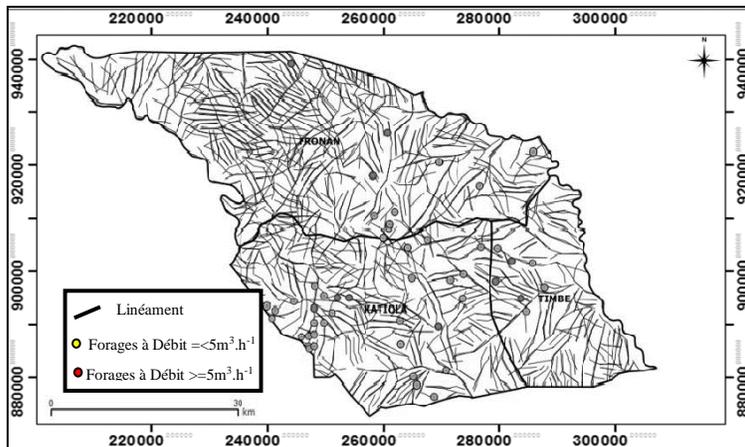


Figure 6 : Validation des linéaments par corrélation avec les puits et forages réalisés dans la zone d'étude

Toutes ces fractures sont interconnectées formant ainsi des nœuds et/ou des intersections. En outre, l'intersection apporte des informations hydrauliquement importantes. Une plus forte intersection et une plus forte densité de fracturation indiquent des endroits où l'eau souterraine pourrait circuler davantage.

La figure 7 montre que le réseau de fractures interconnectées formant des zones d'intersection (en rouge) est plus dense dans la partie Centre et Nord du département (cercle en vert). L'étude de ces linéaments présente les zones de recharge des aquifères discontinus du socle. La forte intersection et la forte densité retrouvée dans la partie Centre et Nord du département indiquent donc que l'écoulement des eaux souterraines pourrait être plus important dans ces zones. Par ailleurs, ces paramètres de fracturation observés seraient de bons indicateurs d'obtention d'un grand débit d'eau souterraine.

La performance des algorithmes utilisés dans les SIG ont permis également de faire ressortir de façon précise toutes les coordonnées des linéaments extraits (début et fin des linéaments) ainsi que les coordonnées des zones d'intersection de ces linéaments.

Tout ceci a été rendu possible grâce à l'utilisation des SIG. Ainsi pour les linéaments d'une zone donnée, il est possible par les SIG, d'obtenir avec précision leurs points d'intersection avec leurs coordonnées. Ce qui pourra faciliter l'implantation des ouvrages avec précision à des endroits géolocalisés.

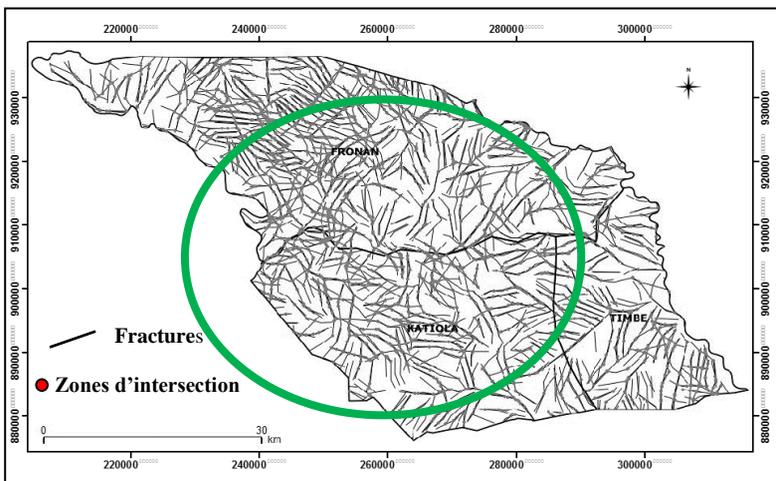


Figure 7 : Réseau de fractures interconnectées de la zone d'étude

Résultats du traitement des relevés de puits et forages

Après avoir déterminé les caractéristiques de la fracturation dans les paragraphes précédents, avec la localisation des zones d'intense fracturation et de recharge en eau souterraine, ce paragraphe présentera les résultats de l'analyse spatiale des débits.

La figure 8 présente la carte des valeurs de débits obtenues par krigeage. Cette carte permet de visualiser les zones à forts et faibles débits. Elle permet de prévoir les zones à forts débits exploitables. Elle constitue ainsi un outil d'aide à la décision d'implantation d'ouvrages.

En effet, les zones en couleur jaune représentent les sites à gros débits tandis que les zones en vert présentent les sites à faibles débits.

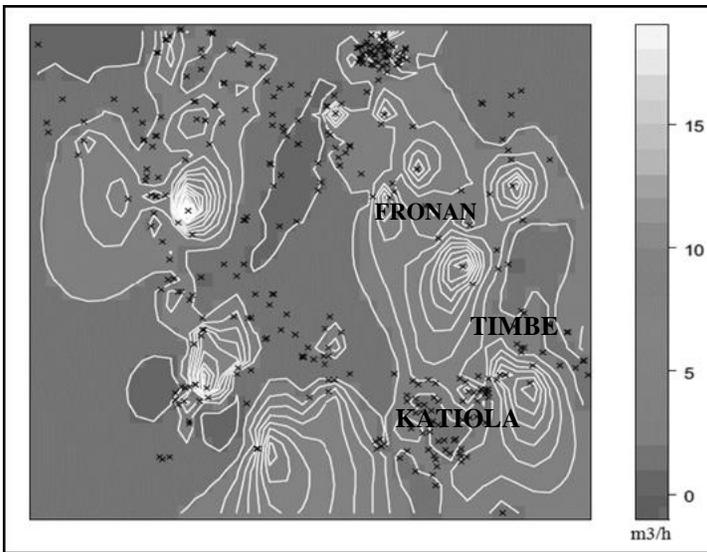


Figure 8 : Carte de prévision des débits par krigeage

Cartographie des sites propices d'implantation des ouvrages de captage

Nous avons analysé précédemment la longueur, l'orientation et la densité des linéaments, ainsi que les denses zones d'intersection géoréférencées, à l'origine d'un bon écoulement d'eau souterraine. Le krigeage a permis de prévoir les

zones à gros débits exploitables. La combinaison des informations sur les zones à forte densité d'intersection et de fracturation, et les zones à gros débits exploitables dans le LIG QGIS, permet de faire ressortir les zones propices d'implantation des puits et forages (figure 9). Ce qui permet d'orienter la décision d'implanter de façon optimale ces ouvrages tout en réduisant le taux d'échec.

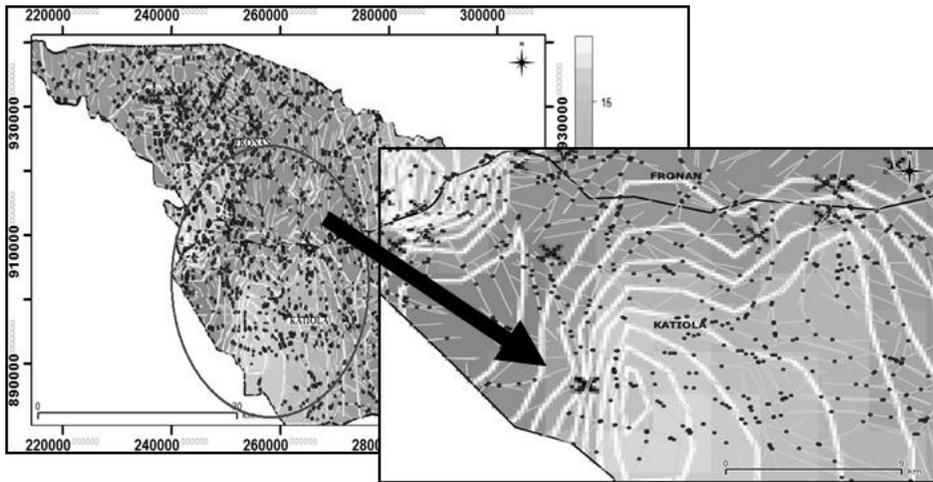


Figure 9 : Carte des zones propices aux ouvrages de captage

La carte ci-dessus (figure 9) présente les zones propices d'implantation des puits et forages. En effet, la combinaison dans QGIS de la carte de prévision des débits et du réseau de fractures, fait ressortir les zones potentielles d'implantation des ouvrages. Cette carte montre que les zones exploitables, avec une forte densité de fracturation et de gros débits, se localisent dans le Sud du département de Katiola (cercle en rouge). Elle constitue un précieux outil d'aide à la décision : elle permet d'orienter les décideurs dans leur prise de décision d'implanter de façon raisonnée de nouveaux forages à débits importants, en vue de l'approvisionnement en quantité suffisante d'une eau potable aux populations dans cette zone.

DISCUSSION

La réalisation de la carte des linéaments a été possible grâce à l'utilisation de puissants algorithmes incorporés dans les logiciels d'information géographique. Les détails linéaires observés sur la carte, témoignent des phénomènes géologiques profonds : failles, fractures, contacts géologiques susceptibles d'influencer l'écoulement des eaux souterraines en direction des nappes de la zone. Cela a été confirmé dans les travaux antérieurs menés par Savané (1997), Saley (2003), Jourda (2005), Youan *et al.* (2008) et Akamé *et al.* (2013). Toutefois, la méthode d'extraction manuelle utilisée dans ces travaux s'avère difficile d'usage et subjectif pour un opérateur non averti, n'ayant aucune connaissance du terrain (Koïta, 2010). La carte des linéaments produite automatiquement est jugée très efficace en termes de coût et de temps (Kocal *et al.*, 2004). La carte des fractures, obtenue ici par la méthode automatique d'extraction des linéaments, est très satisfaisante tant du point de vue de la rapidité d'extraction que de la précision et la fiabilité des informations fournies. Pour cela, la méthode d'extraction automatique est préconisée.

La qualité des informations obtenues découle de la qualité des images satellitales d'interférométrie radar utilisées. En effet, selon Lasm *et al.* (2004), les images satellitales traitées permettent de mieux faire ressortir les objets structuraux et géologiques et d'établir des cartes linéamentaires plus détaillées, comparativement aux photographies aériennes. L'analyse orientée objet menée sur les images SRTM d'interférométrie radar a permis d'extraire automatiquement et efficacement des informations fiables, base de toute décision de gestion sûre pour des études hydrogéologiques.

L'analyse des linéaments et des rosaces directionnelles a montré que la direction de distribution NW-SE est majoritaire en fréquence, nombre, densité et longueur, suivie par la direction EW. Ce résultat est en accord avec celui de Coulibaly (2009 b). Cela indique que les fractures à rechercher dans la zone, lors d'une campagne hydraulique, doivent être de direction NW-SE et EW. De même, l'utilisation des SIG a permis de faire ressortir les denses zones d'intersection avec leurs coordonnées. Celles-ci associées aux fractures ouvertes ont été confirmées par Savané (1997) comme des zones à rechercher. Elles forment des zones très perméables pour la recharge de l'eau souterraine. Leur localisation précise par leurs coordonnées pourra faciliter l'implantation des ouvrages avec réduction des taux d'échec.

La difficulté des travaux d'extraction des linéaments reste leur validation. En effet, l'épaisse couche d'altérite surmontant le socle de la zone d'étude n'a pas facilité une bonne étude de terrain. A cette difficulté, s'associent les limites dues au temps. Le réseau hydrographique et la carte photo-géologique ayant servi de support de validation, pourraient être complétés par des mesures sur les affleurements pour renforcer les résultats acquis.

L'analyse variographique des relevés de puits et forages associée au krigeage ont été nécessaires pour la prévision des zones à gros débits exploitables. Le krigeage se présente ici comme la méthode par excellence de prévision (Coulibaly, 2009 b). Les résultats obtenus par cette méthode sont assez fiables et reflètent la réalité de terrain. La combinaison des informations issues des linéaments et des relevés de puits et forages de la zone a permis de prévoir les sites propices d'implantation d'ouvrages de captage. Les cartes obtenues des images d'interférométrie radar sont de bonne qualité et représentent assez fidèlement la réalité puisque les informations fournies par ces images montrent une vraisemblance avec la réalité de terrain. Ce qui fait de ces cartes de précieux outils de décision et de gestion. Cela a été confirmé par les travaux de Coulibaly (2009 b).

L'utilisation des SIG et de la télédétection a permis de vérifier l'exactitude des informations extraites des images SRTM. Les résultats obtenus donnent une vision assez nette aux décideurs. Le couple télédétection-SIG se présente ainsi comme un outil d'aide à la décision.

L'étude menée ici se rapproche à la fois de celle de Wade *et al.* (2008) et de Gilliéron et Chazal (2010), en ce sens que ces études ont abouti à la mise en place d'un système de décision assistée par télédétection et SIG, en vue de fournir des informations utiles, pour aider à une prise de décision rapide et efficace pour la gestion de catastrophes naturelles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La nécessité de disposer d'informations fiables étant un préalable à l'élaboration d'un bon outil d'aide à la décision, nous a permis de faire ressortir les éléments qui servent de base à l'élaboration d'un système de décision adapté à la conduite des processus de gestion des ressources en eau.

Au niveau du premier objectif spécifique, l'étude a montré que l'utilisation du couple télédétection-SIG permet de mettre en évidence les structures géologiques qui peuvent contribuer à l'identification des zones d'infiltration des

eaux en milieu de socle. Les puissants algorithmes incorporés dans les logiciels d'information géographique ont servi à extraire les linéaments, leurs coordonnées et leurs intersections, et à établir une cartographie des zones susceptibles de développer des aquifères. L'analyse en fréquence, en orientation, en nombre, en densité et en longueur des linéaments obtenus a fait ressortir que les fractures de directions NW-SE sont majoritaires. De plus, les fractures interconnectées formant de fortes zones d'intersection constituent des zones hydrauliquement favorables pour la circulation d'eau souterraine. Ces zones peuvent en outre être repérées par leurs coordonnées (position) fournies par le couple télédétection-SIG. Ce qui facilite l'implantation des ouvrages avec précision.

Quant au second objectif spécifique, l'analyse variographique des données hydrogéologiques combinée au krigeage a fait ressortir les zones à gros débits. L'intégration et la combinaison de ces informations dans le LIG QGIS ont permis de cartographier les zones susceptibles de faire l'objet d'une prospection hydrogéologique avec promesse de succès, et celles à exclure. La carte obtenue facilite les décisions. Elle oriente les décideurs dans leurs prises de décision d'implanter de façon raisonnée de nouveaux forages à débits importants, dans une optique d'amélioration de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural.

Les cartes obtenues au niveau du troisième objectif spécifique constituent des puissants outils d'aide pour la prospection et l'exploitation des eaux souterraines. L'utilisation de ces outils pourrait, en effet, limiter l'obtention des faibles débits et réduire fortement le taux d'échec.

L'étude menée ici aboutit à l'obtention d'outils d'aide pour l'optimisation du positionnement des ouvrages de captage, en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau. Elle se veut être une nouvelle approche méthodologique en matière de gestion de l'eau.

En perspectives, plusieurs améliorations pourraient être apportées aux approches proposées dans cette étude. Les résultats de ces travaux devraient constituer en outre un point de départ dans l'application de nouvelles approches pour la prospection durable des eaux souterraines en zone de socle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAUDOT Y., (1997). L'influence de la résolution effective des données télédéteectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. p. 3-13.
- BIEMI J., (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Nat. Côte d'Ivoire, 479 p.
- CHANG Y.-C., SINHA G., (2007). A visual basic program for ridge axis picking on DEM data using the profile-recognition and polygon-breaking algorithm. *Computers & Geosciences* 33 (2007) pp. 229–237. URL: <http://ycc.dwu.edu.tw/Research/RidgePicker.htm>.
- COULIBALY N., (2009a). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Denguélé (Côte d'Ivoire). Thèse Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan.
- COULIBALY T. J. H., (2009b). Répartition spatiale, Gestion et Exploitation des eaux souterraines : Cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire. Thèse Université d'Abobo-Adjamé, version 1 du 7 Nov. 2011, 135p.
- DOUMBIA S., POUCKET A., KOUAMELAN A., PEUCAT J.J., VIDAL M. ET DELOR C., (1998). Petrogenesis of juvenile-type Birimian (Paleoproterozoic) granitoids in Central Côte d'Ivoire, West Africa: geochemistry and geochronology, 33-63.
- ELLOUMI W., LECONGE R., ROYER E. ET TREUILLET S., (2011). Localisation pédestre : Synthèse bibliographique et illustration d'une approche par vision monoculaire embarquée.
- GNAMBA F. M., OGA Y. M. S., GNANGNE T., LASM T., BIEMI J., KOUAKOU Y. K. N., (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal* February 2014 edition vol.10, No.5 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. pp 79-98.
- JOURDA J. P., (2005). Méthodologies 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 de la zone test de Korhogo (Côte d'Ivoire). Thèse, Université de Cocody, Abidjan. 402 p.
- JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUE E. V., KOUAME 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, (5), 339-357.

- KOCAL A., DUZGUN H. S. ET KARPUZ C., (2004). Discontinuity mapping with automatic lineament extraction from high resolution satellite imagery. Consulté le 11/12/2014 www.metu.edu.tr
- KOÏTA 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, 220p.
- KOUAME K.F., GIOAN P., BIEMI J. ET AFFIAN K. (1999). Méthode de cartographie des discontinuités-images satellitales : exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Téledétection*, 2 : pp. 139-156.
- KOUDOU A., KOUAME K. F., YOUAN T. M., BACHIR M. S., JOURDA J. P. ET BIEMI 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). *Photo interprétation (Paris)*, vol. 46, no3-4, pp. 98-115.
- Lasm T., Kouame F., Soro N., Jourda J. P. R., et Biemi J., 2004. Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danane (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 05 (2004) pp135 – 154.
- Masoud A. A. et Koike K., 2011a. Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2011) pp. 818–832.
- Masoud A. A. et Koike K., 2011b. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: Application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt. *Tectonophysics* 510 (2011) pp. 291–308.
- N'guessan Bi V. H., Saley M. B., Wade S., Djagoua E. V., Kouamé F., et Affian K., 2015. Extraction par télédétection et analyse statistique du réseau de fractures, en milieu de socle, dans le département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*. Vol. 13 No. 1 Jan. 2015, pp. 225-238. <http://www.ijisr.issr-journals.org/>
- Oufella S., Hamdadou D. et Bouamrane K., 2008. Conception d'un système interactif d'aide à la décision collective en localisation spatiale. <http://ceur-ws.org/Vol-547/174.pdf> consulté le 11 octobre 2014.
- Saley M. B., 2003. Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Université de Cocody, 211 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). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat Univ. Cocody, partie I, pp. 38-40.

- Savané I. et Biemi J., 1999. Télédétection et système d'information géographique dans l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, Vol. 1, pp. 47- 64.
- Wade S., Rudant J. P., Ba K. et Ndoye B., 2008. Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : Applications à l'étude des inondations urbaines de Saint Louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à Nioro-du-Rip (Sénégal). *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3, pp. 203-210.
- Youan T. M., 2008. Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse Université de Cocody, 237 p.
- Youan T. M., Lasm T., Jourda J. P., Kouamé K. F., et Razack M., 2008. Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) , Article, *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 2, p. 119-135.