

Cartographie des fractures productives en eau souterraine dans le bassin versant de la Bénoué : apport de la géomatique

Nana Oumarou Baba, Ing

Doctorant, Chercheur, Unité de Formation Doctorale
(Mécanique, Hydraulique et Génie Civil), Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique de l'Université de Maroua

Ewodo Mboudou Guillaume, MC

Enseignant, Chercheur au Département d'Hydraulique et Maîtrise des Eaux,
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua,
Université de Maroua, Cameroun

Diguim Kepnamou Amadou, PhD

Enseignant, Chercheur au Département de sciences de la terre,
Faculté de Sciences. Université de Garoua, Cameroun

Messi Gabriel, Ing

Doctorant, Chercheur, Unité de Formation Doctorale (Mécanique,
Hydraulique et Génie Civil), Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique de l'Université de Maroua, Cameroun

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n33p265](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n33p265)

Submitted: 01 September 2024

Accepted: 15 November 2024

Published: 30 November 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Nana O.B., Ewodo M.G., Diguim K.A. & Messi G. (2024). *Cartographie des fractures productives en eau souterraine dans le bassin versant de la Bénoué : apport de la géomatique*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (33), 265.

<https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n33p265>

Résumé

L'objectif de ce travail est de produire la carte de fracturation de la zone étudiée et identifier les failles porteuses de minéralisation d'eau à travers l'usage couplé de télédétection et des SIG. Pour ce faire, l'image Landsat OLI et SRTM sont utilisées pour visualiser, modéliser le bassin versant et ressortir les structures linéamentaires à travers la combinaison de la méthode automatique et l'extraction manuelle par filtrages directionnels. A l'issue des différentes opérations ayant conduit à la validation de la carte de fracturation, il ressort que le bassin versant amont Bénoué est une zone fortement fracturée avec une densité de fracturation comprise entre 3,03 km/Km² et 8,63 km/Km².

Une campagne d'identification et de collecte des fiches des ouvrages hydrauliques a permis de recenser et géolocaliser 63 puits et 40 forages. Les opérations de traitement ont été effectuées sur les données des ouvrages et 12 forages ont retenus l'attention dans cette étude. A cela s'ajoute les opérations effectuées sur des images pour une meilleure connaissance des aquifères du bassin. Les fiches techniques des ouvrages sont exploitées pour déterminer les principaux paramètres hydrauliques essentiels et ont servi dans l'identification des failles productives en eau. Le calcul de débits d'exploitation et la transmissivité des ouvrages, superposés sur les fractures ou les zones de densité de fracturation élevée ont permis d'identifier, de cartographier et de classer les structures par ordre d'importance. Les résultats de ces calculs a permis de constater que les transmissivités du bassin oscillent entre 0,017 et 0,178 m²/h. Elles illustrent à souhait que les aquifères du socle soudano sahélien du Cameroun ont une forte fonction conductrice.

Mots-clés: Cartographie, SRTM, Linéament, hydrogéologie, hydraulique, SIG

Mapping Productive Fractures in Groundwater in the Benue Watershed: Contribution of Geomatics

Nana Oumarou Baba, Ing

Doctorant, Chercheur, Unité de Formation Doctorale
(Mécanique, Hydraulique et Génie Civil), Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique de l'Université de Maroua

Ewodo Mboudou Guillaume, MC

Enseignant, Chercheur au Département d'Hydraulique et Maîtrise des Eaux,
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua,
Université de Maroua, Cameroun

Diguim Kepnamou Amadou, PhD

Enseignant, Chercheur au Département de sciences de la terre,
Faculté de Sciences. Université de Garoua, Cameroun

Messi Gabriel, Ing

Doctorant, Chercheur, Unité de Formation Doctorale (Mécanique,
Hydraulique et Génie Civil), Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique de l'Université de Maroua, Cameroun

Abstract

This work aims to produce a fracturing map of the study area and identify faults carrying water mineralization through the coupled use of remote

sensing and GIS. To achieve this, Landsat OLI and SRTM imagery were used to visualize and model the watershed and highlight lineamentary structures, through a combination of automatic methods and manual extraction using directional filtering. At the end of the various operations leading to the validation of the fracturing map, it emerged that the upstream Bénoué watershed is a highly fractured zone, with a fracture density ranging from 3.03 km/Km² to 8.63 km/Km². A campaign to identify and collect data on hydraulic structures identified and geolocated 63 wells and 40 boreholes. Processing operations were carried out on the data from the structures, and 12 boreholes received special attention in this study. In addition, image processing was carried out to gain a better understanding of the basin's aquifers. Borehole data sheets were used to determine the main hydraulic parameters and to identify water-bearing faults. Calculations of operating flow rates and transmissivity of structures, superimposed on fractures or zones of high fracture density, enabled the structures to be identified, mapped, and ranked in order of importance. The results of these calculations show that transmissivities in the basin range from 0.017 to 0.178 m²/h. They illustrate that the aquifers of the Sudano-Sahelian basement of Cameroon have a strong conductive function.

Keywords: Mapping, SRTM, Lineament, hydrogeology, hydraulics, GIS

Introduction

Parmi les types de réservoirs souterrain, les aquifères de socle constituent une problématique pendante à cause de leurs faibles productivités en eau. Le caractère hétérogène des aquifères rendent souvent leurs explorations complexes (Lachassagne *et al.*, 2008). Ils sont le plus souvent isolés les uns des autres et s'associent à des couloirs de fracturation qui découlent de la tectonique régionale (Gandolfi *et al.*, 2010). Cette association leur confère une productivité variée parfois influencée par l'épaisseur d'altération et le réseau de fissure (Dewandel *et al.*, 2006 ; Lachassagne *et al.*, 2011). Au Cameroun, le débit d'exploitation des ouvrages dans la zone de socle soudano sahélien de l'Extrême Nord varie entre 0,04 m³/h et 4 m³/h (Ewodo *et al.*, 2017). Dans la zone de socle soudano sahélien de transition jusqu'ici faiblement explorée, le taux élevé des ouvrages négatifs se présente avec acuité. Une des solutions pour améliorer la connaissance hydrogéologique du milieu est l'établissement de la corrélation entre la fracturation et les ouvrages positifs. Les travaux de Yao *et al.*, 2012 ont montré qu'il est nécessaire de commencer l'exploration hydrogéologique par les études structurales. L'avancé technologique a permis à Akokponhoué *et al.*, 2019 de hisser la méthode de télédétection comme meilleure approche d'étude structurale régionale. Elle constitue un outil indispensable et un moyen rapide

d'observation à grande échelle dans la prospection hydrogéologique (Jofack Sokeng., 2016) et la cartographie de réseau de fracture en milieu de socle (Youan Ta *et al.*, 2014 ; Jofack Sokeng., 2016 ; Galanos *et al.*, 2006 ; Jourda *et al.*, 2006). Toutefois, la fiabilité des résultats obtenus par télédétections et leurs validations constituent quelques problèmes (Lasm., 2000 ; Jourda., 2005 ; Youan Ta., 2008). Néanmoins, les observations de terrain viennent appuyer les rendus obtenus par télédétection en confirmant ou infirmant afin de faciliter leur validation. Elle permet de mieux localiser les discontinuités géologiques et les zones à fort intérêt hydrogéologique. L'utilisation combinée de télédétection et SIG peut remédier au manque de données et permettre l'identification des fractures porteuses d'eau souterraine. (Alle *et al.*, 2018 ; Soro *et al.*, 2017 ; Akokponhoué *et al.*, 2019). Le présent travail, vise la cartographie des failles favorable à la circulation de l'eau à travers l'usage de SIG et télédétection.

Présentation du secteur d'étude

Le secteur d'étude situé au SE de la Commune de Mbé (figure.1), est un bassin versant. Il couvre une superficie de 903,69 km² et un périmètre de 163,77 km. Ce secteur d'étude est localisé entre les longitudes 13,406°E et 13,835°E et les latitudes 7,567°N et 7,875°N. Son collecteur principal est le cours d'eau Bénoué à écoulement permanent : d'où l'appellation bassin versant amont Bénoué. Il se caractérise par un réseau hydrographique de type dendritique avec une forte dominance d'écoulement spasmodique. Le climat est de type tropical sec. Il est caractérisé par des irrégularités spatio-temporelles et des hauteurs annuelles de pluies variant entre 600 mm et 1000 mm. Sa température moyenne annuelle se situe autour de 25°C en avril (mois le plus chaud) et de 19°C en décembre (mois le plus froid) (Suchel., 1972). Sur le plan géomorphologique, le relief du bassin est une pénéplaine localisée dans la partie nord de l'escarpement de Ngaoundéré. La monotonie d'ensemble est rompue par endroit par la présence des buttes, des collines rocheuses rongées par l'érosion. Les pentes sont comprises entre 0 et 10 %. Les altitudes des sommets varient entre 1150 m et 1400 m. les altitudes moyennes sont comprises entre 750 m et 1100 m marqué par des petits dômes de relief. Les vallées de la région drainées en période de crue sont localisées dans les zones de basse altitudes (450 m à 700 m).

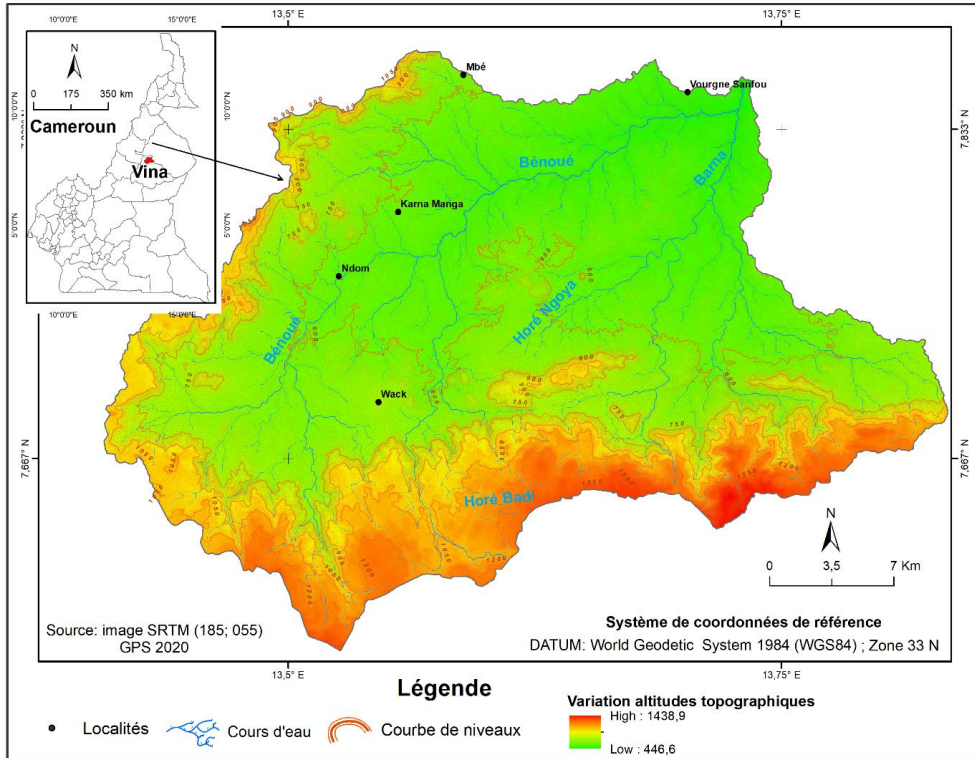


Figure 1 : Localisation du bassin versant

Sur le plan géologique et structural, ce bassin est situé au nord de l'escarpement de Ngaoundéré (Tchakounté *et al.*, 2017). Il est constitué d'un socle cristallin fortement influencé par les mouvements tectoniques (Toteu *et al.*, 2006 ; Dumont, 1987). Les travaux de cartographie géologique de Lassere (1957), de Dumont (1987) sur l'étude structurale des bordures du plateau de l'Adamaoua, de Toteu *et al.*, 2004 et Nzenti *et al.*, 2010) sur la cartographie de la géologie structurale des formations panafricains ont permis de dénombrer huit faciès géologiques : les basaltes, les granites, les gneiss et les formations différenciées (embrechiste, anatexites) et les grands traits structuraux (figure 2).

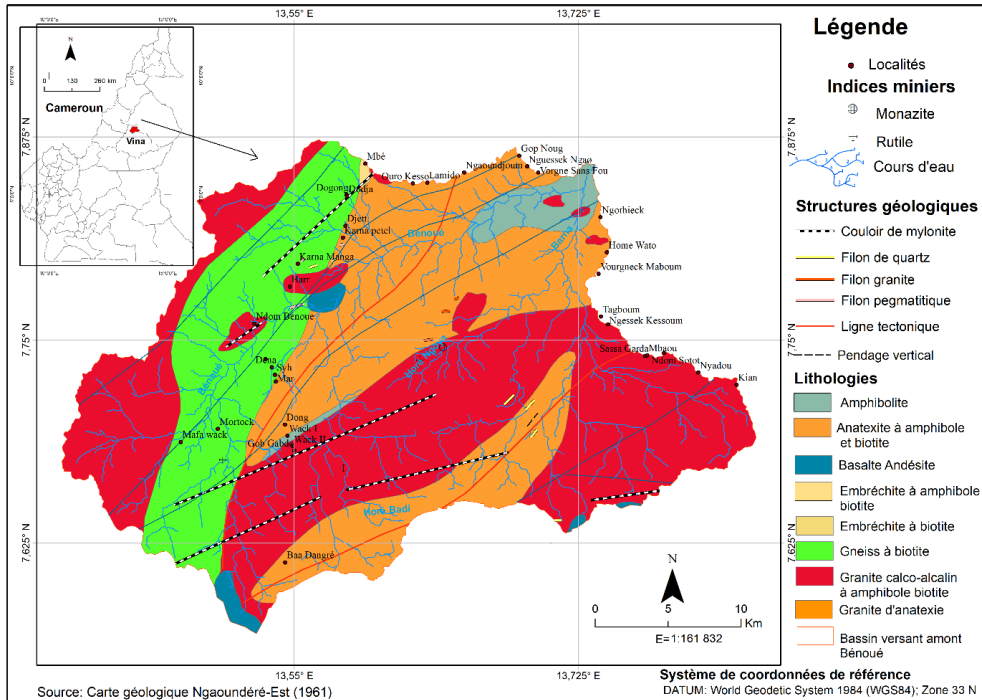


Figure 2 : Géologie du bassin versant amont Bénoué à Mbé

Matériel et méthodes

Données d'étude

Les données collectées concernent : 1) image satellite Landsat 8 obtenue sur le site officiel de Earth Explorer ([https:// earth exploer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov)) scènes 185 – 055 et 184 – 055 téléchargé le 28/01/2021. Son choix a été fait par rapport à la qualité de son domaine d'observation, à leur importance décrite par plusieurs auteurs (Oussou *et al.*, 2019 ; Boubacar et Konaté.,2020) dans la discrimination des linéaments ; 2) l'image SRTM de 30 m de résolution de path et row respectivement 185 et 055 avec les coordonnées comprises entre 13,41 et 13,83 de longitude et 7,57 et 7,87 de latitude. Il a permis de délimiter le bassin versant, de cartographier les linéaments hydrographiques, les pentes et faire une analyse détaillée de la géomorphologie du secteur étudié ; 3) les anciennes cartes géologiques ont servi à la validation des résultats issus du traitement d'image.

En plus de ces données, les fiches techniques des ouvrages hydrauliques obtenues dans les administrations en charge de l'eau, bureau d'études et entreprises de foration ont servi à la discrimination des failles chargées en eau.

Méthodes

Elaboration de la carte de fracturation du bassin versant amont Bénoué Synthèse des anciens travaux

Les anciens travaux sont géoréférencés, numérisés et mise à l'échelle pour servir de document de base de travail préalables à la validation des résultats de traitement d'image. Il s'agit des cartes géologiques suivantes aux échelles variées : la carte géologique du Cameroun de 1979 ; la feuille de Ngaoundéré Est de 1961 et la carte géologique du PRECASSEM de 2021.

Prétraitement des images

C'est une opération préalable à tout traitement. Elle comporte les différentes corrections géométriques, atmosphériques et radiométriques (Ezine *et al.*, 2011). A partir des scènes d'images Landsat 8 OLI téléchargées, ces différentes opérations de prétraitement (correction géométrique, atmosphérique et radiométrique) ont été effectuées à l'aide du module « radiometric » du logiciel Erdas, pour faciliter le processus de traitement et de production des cartes. En plus de ces opérations, on a procédé au mosaïquage grâce à la fonction « mosaic » du menu raster d'Erdas, qui consiste à assembler les scènes d'images satellite (Landsat 8). L'extraction de la zone d'étude s'est faite à l'aide du module « raster vector » et de la fonction « subset-chip » dans le menu raster du même logiciel (figure.3).

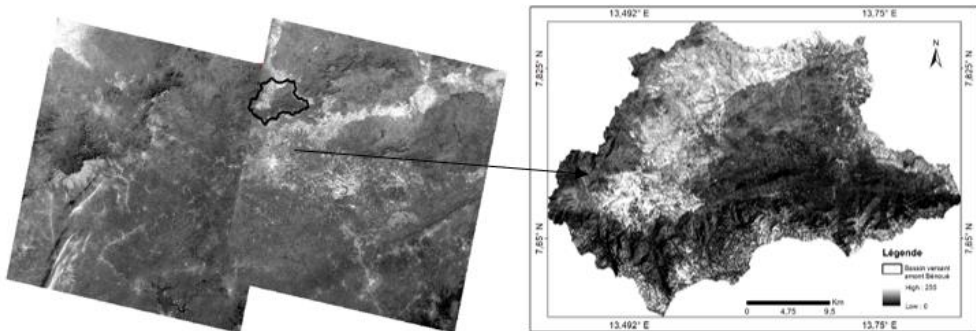


Figure 3 : Délimitation et extraction du bassin versant amont Bénoué sur les scènes Landsat 8

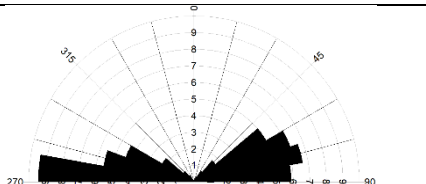
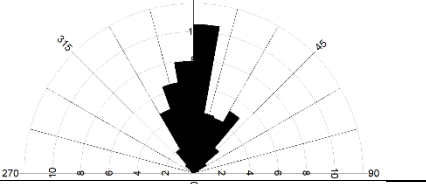
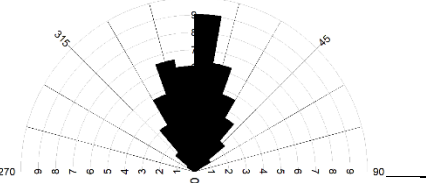
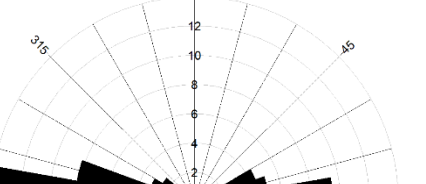
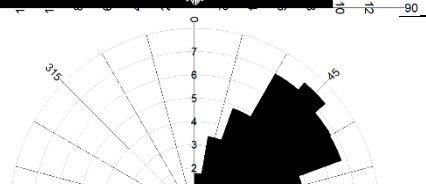
Traitement et extraction linéamentaire

La cartographie des linéaments est la représentation des structures linéaires connues sur un plan. Les linéaments peuvent être regroupés en linéaments hydrographiques, en linéaments d'objets géologiques linéaires ou d'alignement des objets géologiques suffisamment proches (Yao *et al.*, 2012). Les structures linéamentaires sont de plus en plus étudiées en hydrogéologie pour leurs sensibilités à la circulation et parfois à la séquestration des eaux souterraines. Dans le cadre de cette étude, les structures les plus observées

ayant rendu possible la réalisation de la carte de fracturation sont les schistosités et foliation, les failles et les filons.

Les opérations suivantes ont permis de les cartographier. (i) l'analyse en composante principale (ACP) réalisée pour permettre leur extraction automatique à l'aide du module LINE du logiciel géomatica ; (ii) l'extraction des linéaments hydrographiques opérée à l'aide du module ArcMap ; (iii) les filtres directionnels de Sobel (Habib *et al.*,2022 ; Jourda.,2013) de directions N-S ; E-O ; NO-SE et NE-SO, de Prewitt et de Yesou appliqués grâce à la matrice de convolution 7*7 (Boubacar et Konate, 2020). Le rendu final est obtenu à l'issue des opérations de traitement dans un environnement SIG (ArcMap) consistant à éliminer les redondances.

Tableau 1 : Statistique des linéaments obtenus en fonction de la méthode appliquée

N°	Linéaments	Nombre des linéaments	Direction préférentielle des linéaments
1	Previt	946	
2	Sobel E-W	386	
3	Sobel NE-SW	1194	
4	Sobel N-S	80	
5	Sobel NW-SE	1102	

6	Yesou	172	
7	Portion rectiligne des cours d'eau	66	
8	Extraction automatique	1397	
9	Synthèse linéaire	5319	

Validation des résultats de traitement d'image

Les cartes géologiques de la partie donnée d'étude et la carte hydrographique ont servi à la validation de la carte linéaire en carte de fracturation du bassin. Elle a été possible grâce aux observations de terrain (figure 4) et l'identification de répertoire des failles parallèles aux segments rectilignes des cours d'eau, des linéaments identiques et des formations mylonitiques confirmant l'existence de ces failles dans le bassin. Plusieurs travaux (Biemi *et al.*, 1991 ; Sawadogo.,1984 et Jourda *et al.*, 2006) ont montré que la productivité des forages sont influencées positivement selon qu'ils soient localisés sur la fracturation. Les forages productifs identifiés et géolocalisés du bassin serviront dans la validation de la carte linéaire et des structures porteuses d'eau (Kanojin *et al.*, 2012). La figure 5 présente les étapes de conception de la carte de fracturation du bassin versant amont Bénoué à Mbé.



Planche 1: Observations des structures sur le terrain et prise des mesures des attitudes
Sources et coordonnées géographiques : travaux de terrain ; a : 13,52607-7,75753-561m ; b :
13,524811-7,757439-561m et c : 13,528000-7,758412-561m

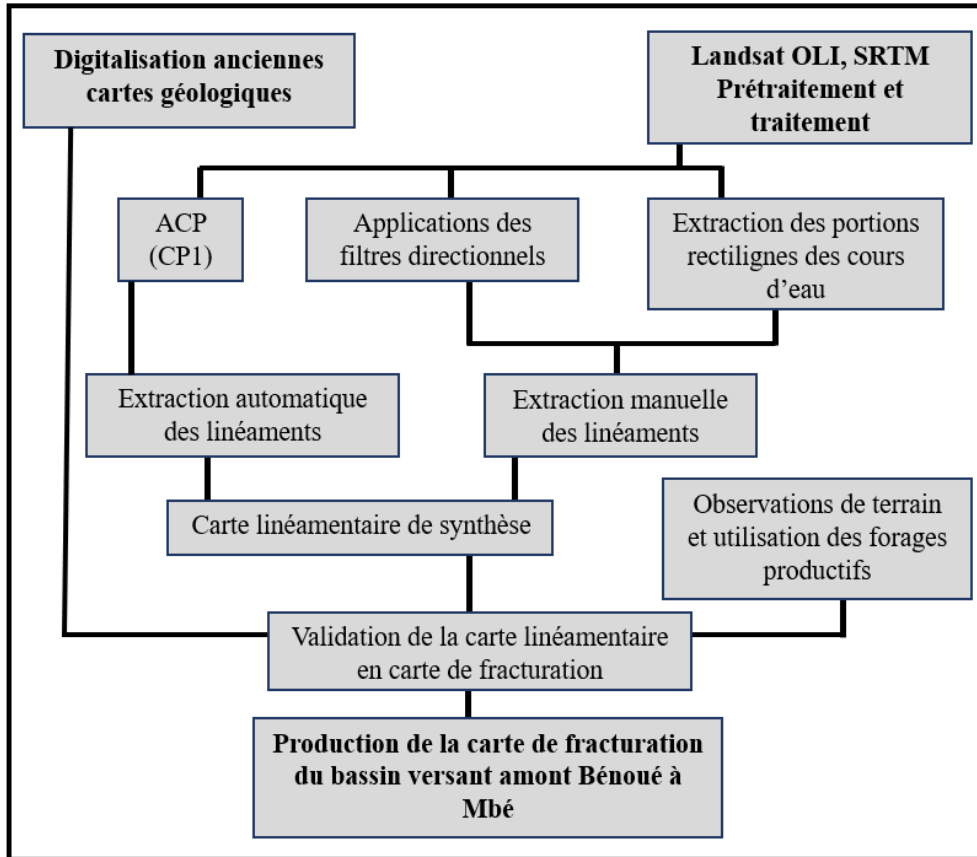


Figure 5 : Diagramme de conception de la carte de fracturation du bassin versant amont Bénoué

Méthode de calcul des densités linéamentaires du bassin versant

La densité linéamentaire est tributaire de la géologie (géologie structurale, pétrographie) et des caractéristiques géomorphologiques. C'est un élément qui permet de cartographier les zones de forte circulation des eaux souterraines. Dans ce travail, la fonction LINE DENSITY de ArcMap grâce à la formule $D_l = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A}$ (D_l : densité linéamentaire, L_i : Longueur des linéaments et A : la superficie du bassin versant) est utilisée pour déterminer la densité linéamentaire du bassin versant amont Bénoué.

Géolocalisation des ouvrages et constitution de la base de données hydrogéologiques

Les travaux de géolocalisation des ouvrages sur le terrain pour la constitution de la base de données ont été exécutés dans le bassin versant amont Bénoué à l'aide du récepteur GPS. La sélection des ouvrages pouvant permettre la localisation et la cartographie des fractures chargées en eau s'est

appuyée sur les critères géologiques et débit d'exploitation des ouvrages. Sur les 103 ouvrages géolocalisés, seul 12 forages permettent de faciliter le processus de classement des structures selon leur capacité à disposer de l'eau.

Tableau 2 : Forages extraits de la grande base de données pour servir la cartographie des structures productives

X (°)	Y (°)	Z (m)	Ouvrages	Profondeur (m)	Débit max à la pompe(m ³ /h)	Nature du socle	Localités
13,695369	7,8568	546	Forage	54	1 m ³ /h	Basalte	Nguesseck Ngai
13,769611	7,740889	618	Forage	55	1 m ³ /h	Basalte	Sassa Garda
13,689222	7,862889	524	Forage	58	4,33 m ³ /h	Granite	Gosnouk
13,5275	7,762167	575	Forage	83	1,2 m ³ /h	Granite	Ndom Bénoué
13,54189	7,69669	715	Forage	46	2,5 m ³ /h	Granite	Wack
13,7037	7,85426	518	Forage	42	2,57 m ³ /h	Gneiss	Vourgne Sanfou
13,55705	7,79411	596	Forage	55	3,75 m ³ /h	Gneiss	Karna Manga
13,54654	7,78204	579	Forage	45	2,4 m ³ /h	Granite	Har
13,53836	7,72495	614	Forage	42	2 m ³ /h	Gneiss	Man
13,60619	7,88036	598	Forage	46	2 m ³ /h	Gneiss	Mbip
13,60043	7,87138	600	Forage	60	1,5 m ³ /h	Gneiss	Panoua
13,59961	7,86976	599	Forage	40	2,77 m ³ /h	Gneiss	Tibang

Sources : Campagne de terrain et fiches techniques des forages (BD 2020 à 2023)

Cartographie et classification des fractures suivant le potentiel de transmissivité

Les débits d'exploitations et la transmissivité des ouvrages représentent une source importante de données devant permettre la cartographie et le classement des fractures selon leurs degrés de favorabilité à la circulation. La classification se fait suite à la superposition des données hydrauliques des ouvrages aux structures cartographiées. Les données de puits utilisées sont celles qui viennent des ouvrages disposant de la ressource en eau en toute saison. Les ouvrages localisés sur les fracturations sont privilégiés dans la cartographie des structures productives.

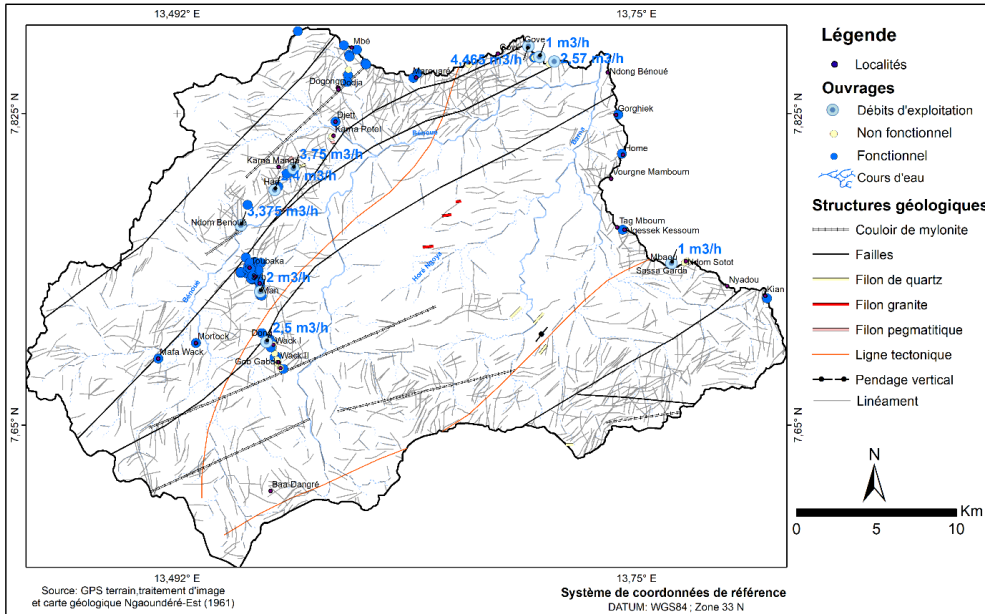


Figure 6 : Superposition des ouvrages productifs aux structures (05 puits, 04 forages)

Résultats

Carte de fracturation du Bassin versant amont Bénoué

Les cartes des figures 7 et 8 présentent les résultats de la cartographie linéamentaire suivant la méthode d'extraction automatique et la méthode manuel respectivement. Sur la figure 7, 1397 linéaments sont cartographiés et présente une direction principale $N45^\circ$ qui est la direction des grandes fractures de la zone et s'identifie également à la direction des cisaillements du couloir Adamaoua Yade. La figure 8 présente 3946 linéaments extraits manuellement avec une orientation préférentielle $N005^\circ$.

La carte de fracturation finale obtenue (figure 9) présente 5343 fractures de direction et de longueur variées. La variation de longueur de fracturation est comprise entre 0,041 km et 4,94 km. La rosace montre deux grandes classes de fracturation selon les orientations :

- Les directions majeures observées dans le quadrant N-E : $N005$ (N-S) ; $N015$; $N025$ et $N035$ (NNE-SSW) ; $N045$ (NE-SW) ; $N055$; $N065$ et $N075$ (ENE-WSW) ; $N095$ (E-W) avec l'orientation principale $N005$;
- Les directions mineures observées dans le quadrant N-W : $N085$ (E-W) ; $N105$; $N115$; $N125$ (WNW-ESE) ; $N145$; $N155$; $N165$ et $N175$ (NNW-SSE) avec les plus courtes fracturations orientées $N135$ (NW-SE).

Elle permet de constater que la direction principale des structures du bassin est la direction des schistosités qui est $N005^\circ$.

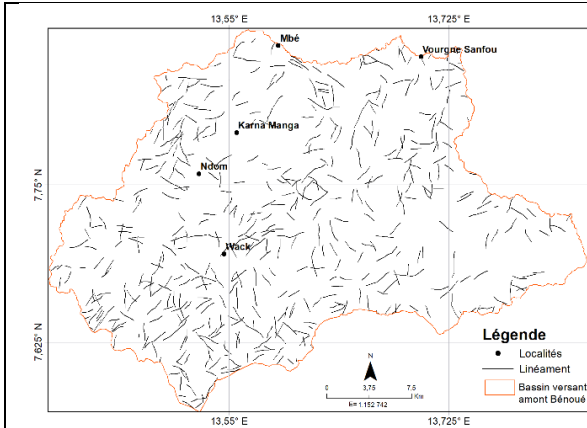


Figure 7 : Extraction automatique des linéaments

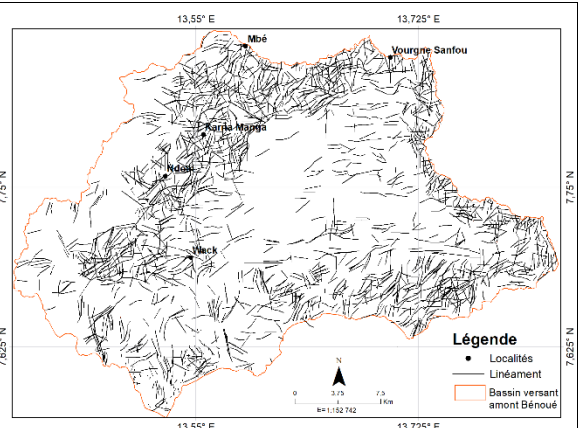
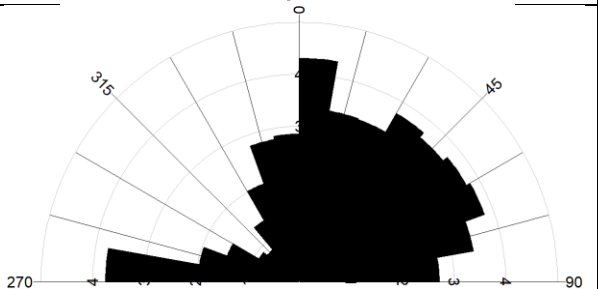
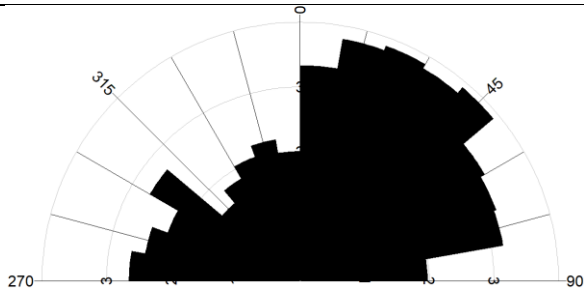
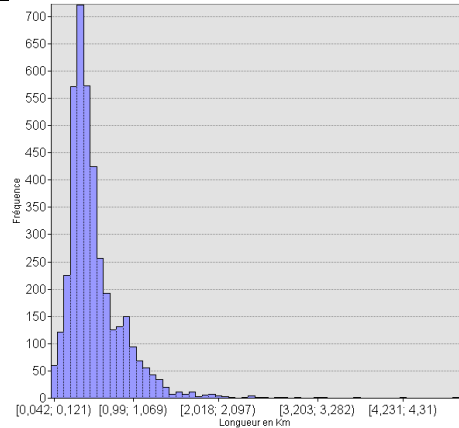
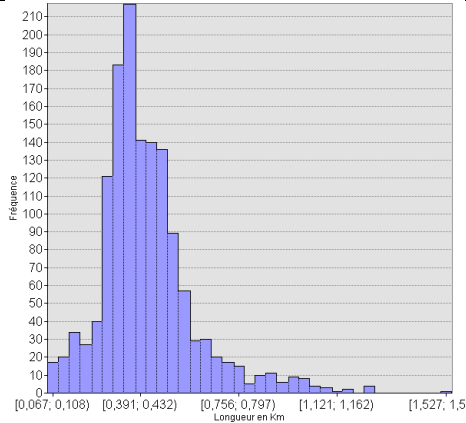


Figure 8 : Extraction des linéaments par filtre directionnel

Statistique	
Count :	1397
Minimum :	0,067082
Maximum :	1,567195
Sum :	610,1514
Mean :	0,436758
Standard Deviation :	0,1782

Statistique	
Count :	3946
Minimum :	0,041883
Maximum :	4,941809
Sum :	2237,30075
Mean :	0,566979
Standard Deviation :	0,351113



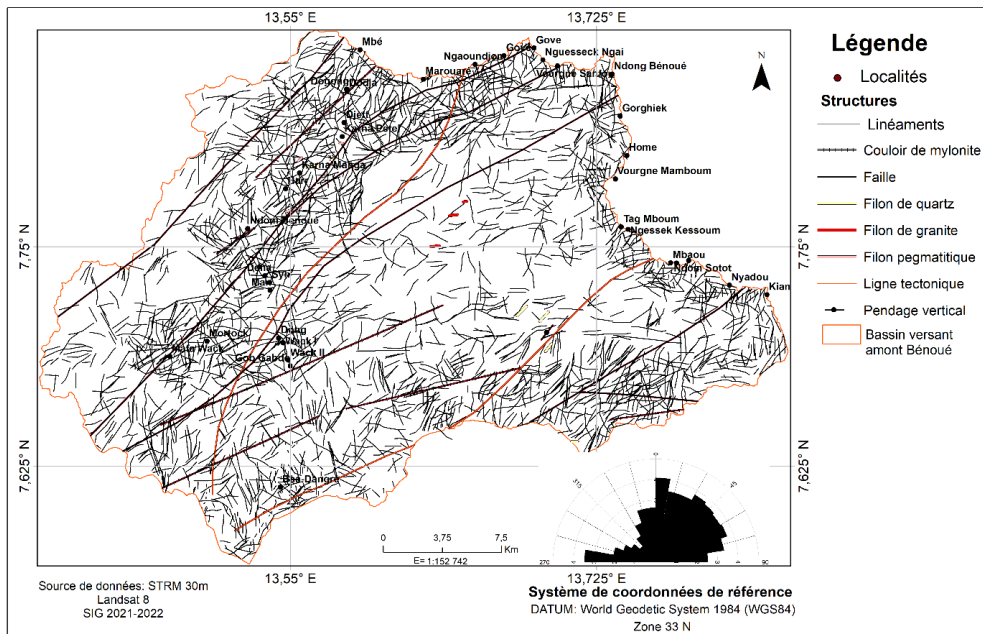


Figure 9 : Fracturation du bassin versant amont Bénoué à Mbé

Zone potentielle de circulation des eaux souterraines

Les écoulements sont contrôlés par les fractures/fissures. Les zones à forte densité de fracturation observées dans la partie N, NNE, SSE en formant une ceinture sur la zone étudiée (figure 10) représente un intérêt certain pour la circulation des eaux souterraines dans le bassin. L'alignement des zones de fortes densités des linéaments s'observe dans les grands couloirs de fracturation du bassin. Ces zones sont marquées sur le terrain par l'alignement des mylonites au niveau de la localité de Ndom et parfois proche de Wack. La partie centrale de notre domaine est marquée par une faible fracturation. Les localités du bassin localisés sur les zones de forte à moyenne densité de fracturation, présentent des ouvrages à débits d'exploitation acceptables (respectivement 2,4 m³/h, 3,75 m³/h et 4,465m³/h). Par contre, les autres localités surfent dans les faibles débits (2 m³/h à 0,911m³/h) selon la classification de Dibi et al., 2004. Les valeurs de densité linéamentaire du bassin varient entre 3,03 km/Km² et 8,63 km/Km².

Les puits des localités positionnés dans les zones à forte densité linéamentaire sont majoritairement positifs et exploités en toute saison malgré la diminution importante du volume d'eau dans ces ouvrages en période d'étiage.

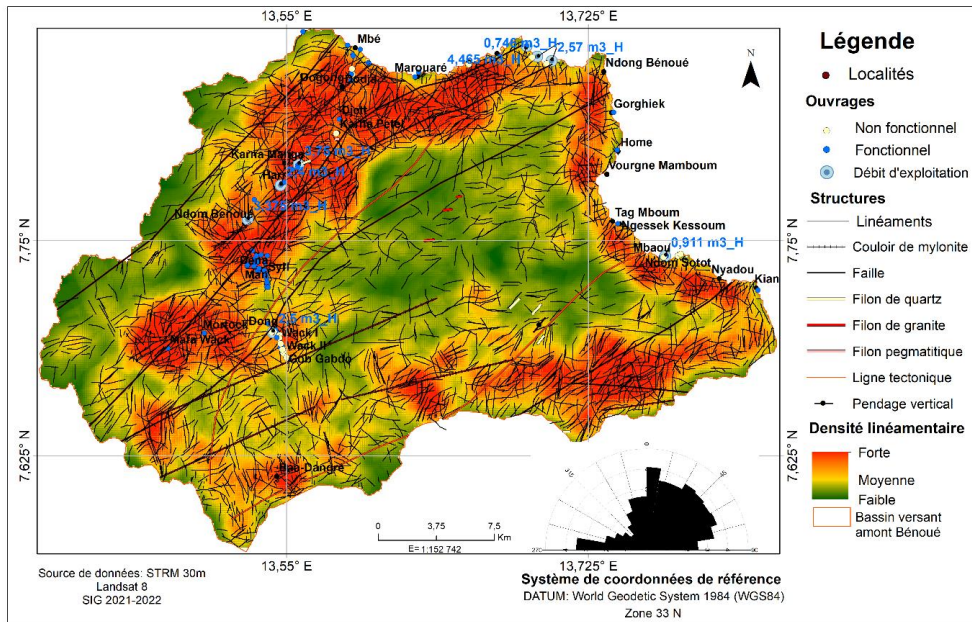


Figure 10 : Densité linéaire du bassin versant amont Bénoué reclassifiée superposée aux débits des ouvrages

Cartographie des structures porteuses d'eau souterraine

La figure 11 présente les failles porteuses de la ressource en eau par degré d'importance. Cette cartographie est obtenue à partir du comportement hydraulique des ouvrages de captage. Les structures ayant une importance certaines ont une orientation NE avec 06 ouvrages directement localisés sur ces fractures. Deux forages à disponibilité permanente d'eau sont localisés sur ces fractures et présentent les meilleurs débits du bassin versant ($4,46 \text{ m}^3/\text{h}$).

Tableau 3 : Classement des structures selon leur production

N°	Classement	Nombre d'ouvrage positif (critère classement)	Orientation
1	Failles très importantes	06 ouvrages (04 puits et 02 forage) à production permanente	NNE
2	Failles importantes	03 ouvrages (puits) à production permanente	NE ; ENE
3	Failles	0 ouvrage réalisé sur la fracture	NNE, NE, ENE et ESE

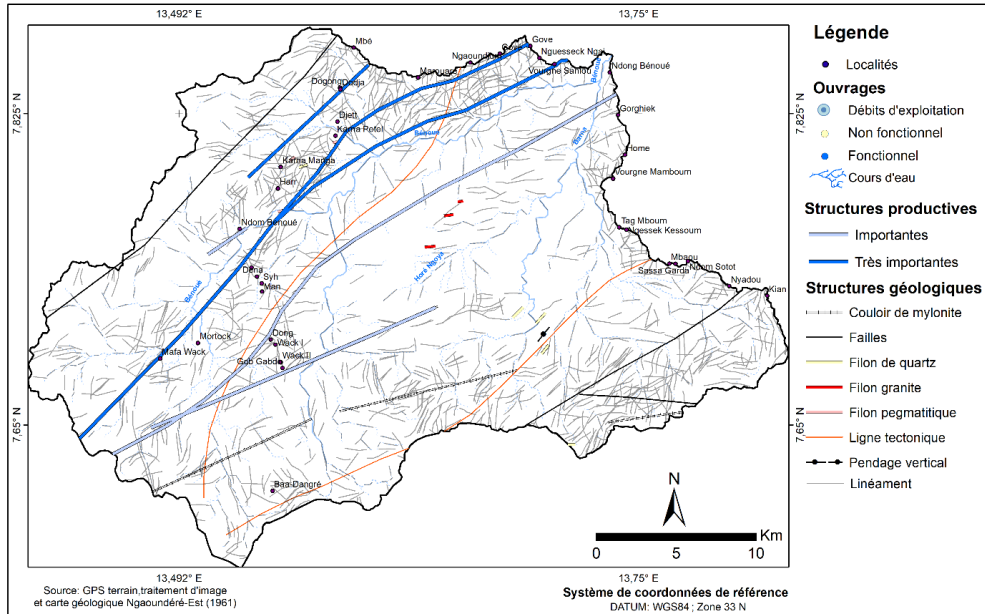


Figure 11 : Structures productives du bassin versant amont Bénoué

Discussions

La caractérisation hydrodynamique des réservoirs fracturés en zone de socle se fait à partir d'une vision globale de l'écoulement (Assemian *et al.*, 2014 ; Bouhsine *et al.*, 2016). Cet écoulement tributaire de la fracturation est souvent modélisé par l'usage de la télédétection. La densité de fracturation est mise en exergue grâce à l'application des techniques de filtrage directionnel. Cette approche a donné des résultats satisfaisants dans des zones similaires (Biemi., 1992 ; Kouamé., 1999 ; Jourda., 2005 ; Youan., 2008 ; Youan *et al.*, 2008 ; Youan *et al.*, 2014 ;). Les résultats obtenus dans cette étude sur le plan géomatique sont conformes aux résultats de plusieurs auteurs ayant travaillé dans la cartographie régionale des fractures en zone de socle pour l'exploration hydrogéologique (Savané *et al.*, 1995 ; Biemi *et al.*, 1991 ; Biemi *et al.*, 1995 ; Savané *et al.*, 1991 ; Saley., 2003 ; Kanohin *et al.*, 2012 ; Koffi *et al.*, 2016 ; Sekouba *et al.*, 2017 ; Oussou *et al.*, 2019 ; koffi *et al.*, 2021 ; Boubacar *et al.*, 2022) ou dans la relation entre la fracturation et la productivité des ouvrages (Khemissi *et al.*, 2015 ; Youan Ta *et al.*, 2015).

Dans ce travail, la validation des résultats obtenus par télédétection s'est faite à partir des ouvrages positifs ayant fait l'objet d'évaluation de leur ressource par les essais de pompage. Cette approche est comparative à celle des auteurs précédemment cités à travers l'usage des SIG pour la validation des résultats de télédétection. La cartographie des structures productives en eau souterraine s'est appuyée sur les ouvrages à production permanente. Par ailleurs, d'autres auteurs combinent la télédétection et la géophysique pour

cette même action (Akokponhoué *et al.*,2019 ; Deffo *et al.*, 2024). Mais il convient de remarquer qu'au regard des propriétés de l'eau, la meilleure méthode géophysique objective est la résonance magnétique des protons (Marie Boucher.,2007). L'approche combinée avec l'analyse multicritère améliore souvent l'identification des potentielles aquifères (Onétié *et al.*,2016 ; Koffi *et al.*,2016). Au-delà de l'exploration, la disponibilité et la permanence des eaux souterraines rendent la ressource relativement favorable à l'exploitation pour les populations (Oussou *et al.*, 2019).

Cette étude révèle les avantages liés à l'usage combiné de télédétection et des SIG dans la phase exploratoire du potentiel hydrogéologique. C'est une approche moins coûteuse et plus rapide dans la couverture des grandes surfaces d'investigation. Le résultat obtenu dans ce travail est satisfaisant. Les réservoirs d'eau souterraine de ce bassin sont concentrés dans les aquifères de fissure et d'altérité. Les études ayant pour principal but de cartographier les structures porteuses de minéralisation d'eau peuvent s'appuyer sur la géolocalisation des ouvrages productifs et leurs capacités à permettre la circulation et l'alimentation durable en eau. Le constat fait au fil des ans met en évidence la qualité des résultats obtenus par l'usage combiné de la télédétection et des SIG dans la phase exploratoire des ressources en eau.

La cartographie effectuée dans cette étude a permis de déceler la direction majeure de fracturation N005°E qui s'avère être celle de Schistosité. Elle correspondrait à une déformation tangentielle à vergence sud selon (Ngako *et al.*,1989). La densité de fracturation constitue une étape essentielle en exploration hydrogéologique des zones de socle. Les zones à forte densité sont souvent recouvertes d'importante couches d'altérations responsables de la qualité des écoulements souterrains. Les ouvrages hydrauliques localisés dans la zone d'influence de la fracturation présentent le plus souvent des débits satisfaisants.

En plus de cette densité de fractures, les structures anciennes (failles) présentent un bon potentiel hydrogéologique avec des débits très important atteignant parfois un débit de 4,46 m³/h.

Conclusion

En définitive, les structures faillées dans la zone sont porteuses de minéralisation d'eau et offre un très bon débit selon la nature géologique traversée. 4,46 m³/h, représente le débit maximal du bassin versant amont Bénoué. La variation obtenue des débits permet de classer les aquifères du bassin dans la catégorie des aquifères à débits moyens. Les formations basaltiques présentent un faible débit (max de 1,6 m³/h) par rapport au socle granitique (4,46 m³/h). L'étude a permis également de mettre en exergue en contexte de socle soudano-sahélien, l'influence de la fracturation sur la production des aquifères. Les ouvrages réalisés sur les fractures ou dans les

zones de densité de fracturation élevées présentent un débit d'exploitation acceptable 2,4 m³/h à 4,6 m³/h. La densité de fracturation du bassin est très localisée. Cette concentration à des endroits bien localisés peut multiplier les sources d'échecs des ouvrages si les études adaptées préalables ne sont pas véritablement effectuées.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aharik, K. et El Garouani, A. (2016). Application du SIG pour la gestion des ressources en eau dans la région de Saïss (Maroc). 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. The 3rd International conference of GIS User. Oujda 22-23 Novembre 2016.
2. Akame, J. M., Mvondo, O. J., Olinga, J. B., Essono, J. et Mbih, P. K. (2013). Utilisation des modèles numériques de terrain (MNT) SRTM pour la cartographie des linéaments structuraux : Application à l'Archéen de Mezesse à l'est de Sangmélina (Sud-Cameroun). *Geo-Eco-Trop.*, 2013, 37, 1 : 71-80
3. Akokponhoué, Y.N., Yalo, N., Akokponhoué, H.B., Youan, T.M., Agbahoungba, G. (2019). Apport De La Télédétection Et De La Géophysique Dans La Cartographie Des Fractures Hydrauliquement Actives En Zone De Socle Au Centre-Ouest Du Benin. *European Scientific Journal* September 2019 edition Vol.15, No.27 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. Doi:10.19044/esj.2019.v15n27p426.
4. Akokponhoué H. B., Yalo N., Adissin Glodji L., Alassane A., Agbahoungba G., Lasm T. (2018). Cartographies structurale des accidents géologiques majeurs du socle cristallin du département de la Donga (Nord-Ouest du Benin): Apport des images landsat-8 Oli et des données de terrain. *Int. J. of Innovation and Applied Stu*, Vol. 24 No. 3 Oct. 2018, pp. 1266-1283. 5.
5. Alle C., Descloitres M., Vouillamoz J.M., Yalo N., Lawson F.M.A., Adihou A. C. (2018). Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Afric, *Journal of African Earth Sciences* 139, 341-353 p.

6. Assemanian, E. A., Kouamé, F. K., Saley, M. B., Affian, K., Youan Ta, M., Jourda, J. R. & Biemi, J. (2014). Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(1), 81–97. <https://doi.org/10.7202/1021984ar>.
7. Assie, AE., Fernand Koffi Kouamé, K.F., Saley, B.M., Kouadio, A., Youan, T.M., Jean Patrice Roger Jourda, J.P.R. et Biemi, J. (2014). Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 27, n° 1, 2014, p. 81-97. <http://id.erudit.org/iderudit/1021984ar>
8. Koffi, A.S., Kouakou, K.É.G., Tuo, Y. O. (2021). Extraction par la teledetection du reseau de fractures majeures pour la prospection de l'eau souterraine dans la commune de Niakaramandougou. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. ISSN 2429-5396 I www.american-jiras.com.
9. Benoît, D. (2019). Aquifères de socle : schémas conceptuels, essais par pompage et régionalisation des propriétés hydrodynamiques. *Hydrologie*. Université de Montpellier, 2019. [fftel-02473850f](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02473850f)
10. Biemi, J., Deslandes, S., Gwyn, Q. H. J., Jourda, P. (1991). Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de Ta Haute Marahoué (Côte d'Ivoire): Apport de la télédétection et d'un système d'information à référence spatiale. *Télédétection et Gestions des Ressources*, vol. 7, pp 41-49, 1991.
11. Biémi J. ; Jourda J. P. ; Deslandes S. Et Gwyn H. (1995). Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. *Télédétection et Gestion des ressources en Eau*, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.
12. Bon, A.F., Ndam, N.J.R., Ewodo, M.G., Ekodeck, G.E. (2016). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun *Hydrogeological characterization of weathered and fissured basement aquifers of the Olezoa watershed in Yaoundé, Cameroon*. *Revue des sciences de l'eau*. Volume 29, numéro 2, 2016. <https://doi.org/10.7202/1036545ar>
13. Boubacar Ali, I., Saley, M. B., Sorokoby, V. M et Koudou A. (2022). Apport de la télédétection et des SIG à l'identification des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans le

- Département de Téra, Ouest du Niger. Afrique SCIENCE 20(5) (2022) 75 - 92 75 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
14. Boubacar, F et Konaté, M. (2020). Utilisation de la télédétection et du SIG pour la cartographie des zones minéralisées en or dans la province panafricaine du sud est Niger (sud Maradi et Damagaram-Mounio). Rev. Ivoir. Sci. Technol., 36 (2020) 230 - 252 230 ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>.
 15. Bouhsine, E.F.I., Said, H., Bouamama, C., Khalid, M. (2016). Rôle De La Fracturation Dans La Circulation Des Eaux Souterraines Et La Répartition Des Sources : Cas Du Bassin Hydrogéologique De Sefrou (Moyen Atlas Septentrional, Maroc). European Scientific Journal August 2016 edition vol.12, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. doi: 10.19044/esj.2016.v12n24p277.
 16. BRGM / CIEH., 1979 - Cartes de planification des ressources en eau du Cameroun ; principaux bassins sédimentaires. 2 feuilles + 1 carte d'ensemble.
 17. Deffo, F., Mbida, Y., Atangana, Y.Q.J., Koah, S.P., Evina Aboula, Y.S., Ndam Njikam, M.M. (2024). Landsat_8 OLI/SRTM et caractérisation gravimétrique des aquifères de fracture panafricains du centre-nord du Cameroun (Afrique centrale), HELIYON (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26319>.
 18. Dewandel B., Lachassagne, P., Wyns, R., Marechal, J.C., Krishnamurthy, N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Hydrology J., 330, 260-284.
 19. Diguim, K.A., Ganwa, A. A., Klötzli, U., Hauzenberger, C., Ngounouno, I., Naïmou, S. 2017. The Pan-African Biotite-Muscovite Granite and Amphibole-Biotite Granite of Doua (Central Cameroon): Zircon Features, LA-MC-ICP-MS U-Pb Dating and Implication on Their Tectonic Setting. Journal of Geosciences and Geomatics, 2017, Vol. 5, No. 3, 119-129 Available online at <http://pubs.sciepub.com/jgg/5/3/3> ©Science and Education Publishing DOI:10.12691/jgg-5-3-3
 20. Dumont, J.F. (1987). Etude structurale des bordures nord et sud du plateau de l'Adamaoua : influence du contexte atlantique. Géodynamique, 2 (1), p. 55-68. ISSN 0766-5105.
 21. Ewodo, M.G., Bon, A.F., Bineli, E., Ntep, F., Ombolo, A. (2017). Caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la région de l'Extrême Nord, Cameroun. JOURNAL OF THE CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES Vol. 14 No. 1 (2017). <https://dx.doi.org/10.4314/jcas.v14i1.3>

22. Ezzine, I., zargouni, F., Ghanmi, M. (2011). Analyse linéaire des images Landsat TM et spot de l'atlas centro-septentrional : cartographie du prolongement SW de la cicatrice de ZAGHOUAN. *Revue Télédétection*, 2012, vol. 10, n° 4, p. 199-211.
23. Fossou, R.M.N., Lasm, T., Soro, N., Soro, T., Soro, G., DE Lasme, O.Z., Baka, D., Onetie, O.Z., Orou, R. (2015). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au centre-est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°21, Mars 2015, pp. 97-120 © 2015 Tous droits réservés
24. Galanos I., Rokos D. (2006). A statistical approach in investigating the hydrogeological significance of remotely sensed lineaments in the crystalline mountainous terrain of the island of Naxos, Greece. *Hydrogeology journal* vol.14, pp 1569-1581.
25. Ghadbane O., El Ghachi M., ARIOUA A. (2016). L'apport des Systèmes d'Information Géographiques dans l'évaluation et la représentation de la qualité des eaux de Surface dans le haut bassin de l'OUM ER RBIA (2000- 2013) Moyen atlas central Maroc. 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. *The 3rd International conference of GIS User*. Oujda 22-23 Novembre 2016.
26. Gandolfi J.M., Wyns R. et Damy, P.C. (2010). Diagnostic des potentialités aquifères des formations de socle en région Mid-Pyrénées. Rapport BRGM/RP-58808-FR. 141p.
27. 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. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429 p. 16.
28. Jourda, P., Saley, M. B., Djagoua, E. M., Kouamé, K. J., Biémi, 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", *Revue Internationale de Télédétection*, Vol. 5, n°4, pp 339-357, 2006.
29. Kouamé, K., Adja, M.G., Saley, M.B., Jourda, J.P.R. (2013). Performing a pseudo-panchromatic SAR image of Radarsat-1 for lithostructural mapping of the Precambrian basement in Korhogo region (North of Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies* 2(4):392-411.

30. Kabre W.P. (2012). Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé, cas De la province du Kourwéogo. Mémoire de Master d'ingénierie en eau et assainissement.
31. Kamagate, B., Gone, D.L., Doumouya, I., Ouattara, I., Ouedraogo, M., Bamba, A et Savane, I. (2011). Relation nappe-rivière dans le bassin versant du Bandama en milieu de socle fissuré en Côte d'Ivoire : approche couplée hydrochimie – télédétection. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(1): 206-216, February 2011. <http://indexmedicus.afro.who.int/>
32. Kanohin, F.E.O., Saley, M.B., Aké, G.E., 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). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2012, 1 (1), pp.35-53. fhal-00771901f.
33. Khemissi, C., Djawhar, K., Fathi,B. (2015). Relation entre fracturation et morphologie et leurs implications hydrogéologiques : Exemple des calcaires fissurés de la région de Chéria, (NE Algérien). *Afrique SCIENCE* 11(1) (2015) 252 - 259 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>.
34. Kra, K.J., koffi, Y.S.K., Alla, K.A. (2016). La ville de Khorogo à l'épreuve de l'approvisionnement en eau potable. *Humanitas*, 15, 2016. Département de Géographie Université Péléforo Gon Coulibaly (Korhogo, Côte d'Ivoire).
35. Koffi, K. M., Yao, K. T., Mobio, A., Oga, Y. M. S. (2016). Apport de l'analyse multicritère à la cartographie des zones favorables à l'implantation de forages dans la région de Gagnoa (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). *Geo-Eco-Trop.*, 2016, 40, 4 : 327-344.
36. Kouadio, A.M., Koraba,M.T. (2019). Accès à l'eau potable et maladies hydriques chez les immigrés dans la ville de Gagnoa (Centre-Ouest de la Cote d'Ivoire). *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 2 (3), 20-40.
37. Kouassi, E.G. K., Kouame, L.N., Sombo,A.P., Djroh,S.P., Sombo,B.C. (2017). Résistivité électrique et géomorphologie : identification des aquifères de socle et critères pour le choix des points d'implantations des forages dans le département de Daoukro, Sud-Est Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE* 13(3) (2017) 98 - 112 98 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>.
38. Kouam,K.G.R., Mpakam, G.H., Ndonwy,A.S., Bopda,D.S.L., et Georges E. Ekodeck,G.E. (2006). « Gestion intégrée des ressources en eau et objectifs du millénaire pour le développement en Afrique : Cas du Cameroun », *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne]*, Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006,

- mis en ligne le 27 avril 2009, consulté le 16 mars 2021. URL: <http://journals.openedition.org/vertigo/2319> ;
DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.2319>
39. Koudamiloro, O., Vissin, E.W., Dipama, J.M. (2017). Caractérisation Des Risques Hydroclimatiques Dans Le Bassin Versant De L’Ouémé A L’exutoire De Bétéro Au Bénin (Afrique De L’ouest). *European Scientific Journal* May 2017 edition Vol.13, No.15 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n15p101>
 40. Koukougnon, W.G., et Guede, C.M. (2020). Analyse de l’état du service d’hydraulique rurale dans la région de l’Agneby Tiassa (sud de la côte d’ivoire). N° 003 Volume 1 Décembre 2020. Géovision.
 41. Lachache S., Merzougui T. (2016). Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique de la Région de Meridja à l’aide d’un SIG (région de Béchar sud-ouest, Algérien). 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. The 3rd International conférence of GIS User. Oujda 22-23 Novembre 2016.
 42. Lachassagne, P., Wyns, R. et Dewandel, B. (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23, 145-161
 43. Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de European Scientific Journal September 2019 edition Vol.15, No.27 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431 447 Côte d’Ivoire Domaine archéen), Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
 44. Leray, S., de Dreuzy, J.-R., Bour, O., Bresciani, E. (2012). Numerical modeling of the productivity of vertical to shallowly dipping fractured zones in crystalline rocks. *J. Hydrol. Géosciences Rennes (UMR 6118 CNRS), Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, 350.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.014>.
 45. Maréchal, J.C., Robert Wyns, R., Lachassagne, P., Kambhampati, S., Touchard, F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l’horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d’altération. *Géosciences de surface/Hydrologie–Hydrogéologie. C. R. Geoscience* 335 (2003) 451–460.
 46. Marie Boucher. Estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères par Résonance Magnétique des Protons dans différents contextes géologiques, de l’échantillon à l’échelle hydrogéologique. Hydrologie. Université d’Orléans, 2007. Français. ffNNT : 2007ORLE2022ff. fftel-00178045f.

47. Messi, O.E.J. et Nsifa, E. (2015). Etude structuro-pétrographique d'une portion du complexe du Ntem dans le secteur de Lolodorf, département de l'ocean (Sud, Cameroun). Editions Universitaires Européennes,2015.
48. Ngouh, A. N., Kpoumie, A., Nyembe Etame.G., Kohtem Lebga,A., Ndjeng, E., Ndam, N.J.R. (2020). Caractérisation Hydrodynamique et Qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun). European Scientific Journal May 2020 edition Vol.16, No.15 ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. Doi:10.19044/esj.2020.v16n15p281
49. N'kongon, Y.J. (2018). Extension du réseau de distribution d'eau potable dans le district d'Abidjan. European Scientific Journal March 2018 edition Vol.14, No.8 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n8p227>.
50. Nkouandou, O.F., Ngounouno, I., Deruelle, B. (2010). Géochimie des laves basaltiques récentes des zones Nord et Est de Ngaoundéré (Cameroun, Plateau de l'Adamaoua, Afrique centrale): pétrogenèse et nature de la source. Int. J. Biol. Chem. Sci. 4(4): 984-1003, August 2010. t <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
51. Nkounkou, L.C., Louzayadio, M.R.F., Ayessou, N., Elouma, N.A.M., Ngakegni-Limbili, A.C., Mar Diop, C.G., Ouamba, J.M. (2017). Approvisionnement En Eau Dans La Ville De Brazzaville, Congo. European Scientific Journal July 2017 edition Vol.13, No.21 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431 474. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n21p474>
52. Nya, E.L., Mougoué, B. (2020). Approvisionnement en eau de consommation et récurrence des maladies hydriques dans la Commune De Bangangté (Ouest-Cameroun). European Scientific Journal April 2020 edition Vol.16, No.11 ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n11p115>.
53. Nzenti, J.P., Abaga, B., Suh, C.E. and Nzolang, C. (2010) Petrogenesis of Peraluminous Magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. International Geology Review, 53, 1121-1149. <https://doi.org/10.1080/00206810903442402>
54. Onétié, Z. O., Lasm, T., Coulibaly, A., Baka, D., Fossou, N. M. R., Youan, T. M., Yao, K. A. F., Aoulou, K. A. (2016). Apport Du SIG Et De L'analyse Multicritère Dans La Prospection Hydrogéologique Du Socle Précambrien De Gagnoa (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire). European Scientific Journal August 2016 edition vol.12, No.23 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. doi: 10.19044/esj.2016.v12n23p137 URL: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n23p137>

55. Ouandaogo-Yameogo, S., Blavoux, B., Nikiema, J. & Savadogo, A. N. (2013). Caractérisation du fonctionnement des aquifères de socle dans la région de Ouagadougou à partir d'une étude de la qualité chimique des eaux. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(3), 173–191. <https://doi.org/10.7202/1018784ar>
56. Oussou, E.F., Oloukoi, J., Yalo, N., Boukari, M. (2019). Analyse Spatiale du Potentiel en eau Souterraine dans le Bassin du Zou au Sud du Bénin (Afrique de L'ouest). *European Scientific Journal* September 2019 edition Vol.15, No.27 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n27p402>
57. Rihab, G., Malek, A., Néji, B., Mohamed, H.I. (2016). Prospection géophysique pour la recherche d'eau souterraine dans le Nord-Ouest de la Tunisie, *Hydrological Sciences Journal*, 61 :3, 636-645, DOI : 10.1080/02626667.2014.914213
58. Saley, M.B. (2003) Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuités pseudo-images, et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, Abidjan.
59. Sawadogo, A. N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta". Etude régionale du Bassin versant de la Sissil. Thèse Doctorat ès Sci. Nat., Univ. Grenoble 1, Inst. Dolomieu, 350 p, 1984.
60. Sauret E. S. G. (2005). Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux souterraines du Projet hydraulique villageoise 310 forages, dans la boucle du Mouhoun : provinces des Banwa, des Bales, du Mouhoun et de la Kossi (Burkina Faso). Mémoire d'ingénieur géologue à Institut des Sciences de la Terre (IST).
61. Savané I. ; Gozé B. ; Biémi J. (1995). Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (Bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). *Téledétection et Gestion des ressources en Eau*, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.
62. Savané I. et Biémi J. (1999). *Téledétection et S.I.G pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)*. *Téledétection*, 1999, Vol. 1, N°1 pp.47-64.
63. Sékouba, O., Gnanogui, C. A., Akpa, Y. L., Saley, M. B., Kouamé, K. F., Therrien, R. (2017). Identification Des Zones Potentielles De Recharge Des Aquifères Fracturés Du Bassin Versant Du N'zo (Ouest De La Côte d'Ivoire) : Contribution Du SIG Et De La Téledétection. *European Scientific Journal* December 2017 edition Vol.13, No.36 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. Doi:

- 10.19044/esj.2017.v13n36p192.
URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192>
64. Soro, D. D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 (UPMC) - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
65. Soro, G., Soro, N., Ahoussi, K.E., Lasm, T., Kouamé, F.K., Soro, T.D., Biémi, J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire). Assessment of the hydraulic properties of fractured aquifers in crystalline and metamorphic formations in the region of Lacs (Central Côte d'Ivoire). *Estudios Geológicos*, 66(2) julio-diciembre 2010, 227-242 ISSN : 0367-0449 doi:10.3989/egeol.40123.093.
66. Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A.A. and Toteu, S.F. (2006) Petrography and Géochemistry of the Ngaoundéré Pan-African Granitoids in Central Nord Cameroon: Implication for Their Sources and Geological Setting. *Journal of African Earth Sciences*, 44, 511-529. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.017>
67. Tchouongsi, K.E., Mougoue, B., Tagne, T.C., Touoyem, M.F., Bonganum, N.S. (2020). Approvisionnement en eau et risques sanitaires dans le bassin versant amont de l'Abiergué à Yaoundé (Cameroun). *European Scientific Journal* March 2020 edition Vol.16, No.8 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431 <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n8p102>
68. Xavier, L.R., Kane, M., Marcellin, C., Sy, M., Ball, O., Diallo, O., Crochet, G., Herbretreau, A.B., Abdoul Ba. (2005). Pauvreté et accès à l'eau dans la vallée du Sénégal. *Pauvreté Hydraulique et Crises Sociales : Colloque International*, Dec 2005, Agadir, Morocco.
69. Xinhui, H., Hong, Z., Junwei, W., Yuan, G., Heng, Z. (2022). The effects of rainfall on groundwater hydrogeochemistry and chemical weathering. *Research square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1548512/v1>
70. Yao, K.T., Fouché-Grobla, O., Oga, Y.M.S., Assoma, T.V. (2012). Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Téledétection*, 2012, 10 (4), pp.161-178. fhal-01948904f.
71. Yao, K.T., Oga, Y.M.S., Fouché, O., Kouadio, K.E., Ferriere, G., Pernelle, C. (2014). Rôle hydrogéologique des linéaments structuraux en milieu cristallin et cristalloyllien : cas du bassin versant du

- Sassandra, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE* 10(4) (2014) 78 – 92. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>
72. Youan Ta, 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 de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236 p.
73. Youan Ta, M., De Lasme, O., Baka, D., Lasm, T., Jourda, J.P., Biemi, J. (2015). Analyse des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère fissuré du socle Paléoprotérozoïque : Aide à l'approvisionnement en eau potable des populations de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 13 No. 3 Nov. 2015, pp. 561-580 © 2015 Innovative Space of Scientific Research Journals <http://www.ijias.issr-journals.org/>
74. Zoungrana, T. P. (2007). Problématique de l'accès à l'eau potable sur les rives du lac de bagré, Burkina Faso. *Rev. Sc. Env. Univ. (Togo)*, 2007, n° 003 ISSN 1812-1413.