

Cartographie des zones favorables à l'implantation des ouvrages hydrauliques ruraux dans le département de Lac-Léré au Tchad

Mapping of identified areas favorable to the establishment of hydraulic structures in the department of Lac-Léré in Chad

*DENENODJI Antoinette (Centre National de Recherche pour le Développement CNRD)
NEKOULNANG Djétounako (Centre National de Recherche pour le Développement CNRD)
NDOUTORLENGAR Médard (Université de Sarh)
GOUAYE KALKI Simplicie (Etudiant Master HydroSIG, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées)
GUINBÉ Amngar (Ministère de l'Eau et de l'Assainissement, Tchad)*

Résumé

Le présent article traite la cartographie des zones favorables à l'implantation des forages productifs pour une bonne couverture des besoins en eau dans le département du Lac-Léré. Situé entre le 14°00' et 14°30' de longitude Est et le 9°35' et 9°45' de latitude Nord, le département de Lac-Léré est dans la Province du Mayo-Kebbi Ouest. Il est sérieusement confronté à un problème d'accès à l'eau potable dans les zones rurales et semi-rurales. Pour réaliser ce travail, nous avons procédé par l'acquisition des données de forage au CDIG et au niveau du Projet GTZH.V-MK, le Programme PAEPA et le téléchargement des images Landsat 8 et SRTM de résolution 30 m. Ces données ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel QGIS. Il ressort de ces analyses les épaisseurs d'altération dans les forages qui sont comprises entre 0,1 et 25 m permettent d'avoir un bon débit, avec une profondeur optimale de 60 m et les cartes thématiques à savoir la carte des potentialités disposant les classes des potentialités en eau souterraine allant de mauvaise (30,76%) à

excellente (11,15%) et la carte des zones favorables dont les classes de potentialité varient de mauvaise (34,06%) à excellente (7,15%). Aussi, les piedmonts constituent-elles des zones favorables à l'implantation des forages du fait de leur topographie basse mais aussi de l'existence d'un réseau dense de fractures. Il serait important de contribuer à la connaissance en science de l'eau par une étude géophysique couplée avec des données satellites (optiques et radar) et des données hydrodynamiques pour confirmer les zones potentielles d'implantation des futurs forages pour le besoin en eau potable de la population du Lac-Léré.

Mots-Clés : SIG, télédétection, linéaments, eau souterraine, cartographie thématique, Mayo-Kebbi Ouest, Tchad

Abstract

This article deals with the mapping of areas favorable to the establishment of productive boreholes for a good coverage of water needs in the Lac-Léré department. Located between 14°00' and 14°30' East longitude and 9°35' and 9°45' North latitude, the department of Lac-Léré is in the Province of Mayo-Kebbi Ouest. It is seriously confronted with a problem of access to drinking water in rural and semi-rural areas. To carry out this work, we proceeded by the acquisition of drilling data at CDIG and at the level of the GTZH.V-MK Project, the PAEPA Program and the downloading of Landsat 8 and SRTM images of 30 m resolution. These data were processed and analyzed using QGIS software. It emerges from these analyzes that the thicknesses of alteration in the boreholes, which are between 0.1 and 25 m, allow a good flow rate, with an optimal depth of 60 m; and the thematic maps, namely the map of potentialities with classes of groundwater potential ranging from bad (30.76%) to excellent (11.15%) and the map of favorable areas whose classes of potentiality vary from bad (34.06%) to excellent (7.15%). Also, the piedmonts constitute favorable zones for the establishment of boreholes because of their low topography but also the existence of a dense network of fractures. It would be important to contribute to knowledge of water science by a geophysical study coupled with

satellite data (optical and radar) and hydrodynamic data to confirm the potential areas for the installation of future boreholes for the drinking water needs of the population of Lac-Léré.

Keywords: GIS, remote sensing, lineaments, groundwater, thematic mapping, Mayo-Kebbi West, Chad

Introduction

L'eau est une ressource essentielle aux besoins fondamentaux de l'homme et à son environnement. Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités. Cette eau vitale est l'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle, bien que 70% de la surface du globe soient recouvertes d'eau, à peine 25% seulement sont constituées d'eau douce (Revue Photo, 2006). De ce fait, plus d'un milliard d'habitants de la planète n'ont toujours pas accès à l'eau potable. Les eaux de surface occupent une place importante dans la satisfaction des besoins en eau en milieu rural, surtout lorsqu'il s'agit d'une région de socle, comme le cas de Liptako Gourma au Niger (Moussa, 2022). Si le niveau de consommation actuel se maintient, la moitié de la population mondiale confrontera à de très grandes pénuries d'eau dans les vingt-cinq prochaines années (Revue Photo, 2006).

D'après les études géologiques antérieures, les roches de la zone d'étude appartiennent au domaine paléo protérozoïque (Précambrien). Ces formations sont des pointements des massifs granitiques calco-alkalins qui occupent des surfaces assez restreintes du Nord vers le Sud (PIAS et al., 1965). Au Tchad, comme un peu partout dans les régions de socle plutonique ou métamorphique, la ressource en eau de surface est limitée et/ou soumise aux forçages anthropique et climatique (Lienou, 2007; Sighomnou, 2004). Les aquifères discontinus des formations de socle cristallin s'avèrent alors primordiaux pour l'approvisionnement en eau des populations (Dewandel *et al.*, 2011; Lachassagne *et al.*, 2011). A l'état sain, ces formations présentent une perméabilité de l'ordre de 10^{-11} m·s⁻¹ et une porosité inférieure à 1 % (Courtois *et al.*, 2009; Lachassagne

et Wyns, 2005; Marechal *et al.*, 2004). Elles sont donc à l'origine sans aucun potentiel hydrogéologique et ne deviennent en général aquifères qu'à la faveur de la fracturation dont l'origine est attribuée par certains à la tectonique (Acworth, 1987 ;Kouame *et al.*, 2010; Taylor et Howard, 2000) et par d'autres à l'altération supergène (Lachassagne *et al.*, 2011; Marechalet *et al.*, 2003; Wyns *et al.*, 1999). Le descriptif des caractéristiques hydrogéologiques n'est que peu abordé par ORSTOM et BRGM. La zone dispose de deux types d'aquifères qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères du socle fissuré. D'autres sources de données existent probablement mais n'ont pas pu être identifiées ni contactées (étude sismique pour prospection pétrolière par exemple). Cependant, des imprécisions existent quant à l'acquisition de la minéralisation, au fonctionnement hydrodynamique des nappes aquifères, à la modélisation hydrogéologique de tels systèmes. La structure et le fonctionnement des aquifères restent de manière générale encore peu connus. L'aquifère n'est pas très bien caractérisé, ni dans sa nature ni dans son fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique. Les rares études le concernant sont restées au stade prospectif. L'absence ou le faible degré des connaissances, réduit considérablement l'accessibilité aux ressources en eau souterraine. En effet, les ouvrages hydrauliques déjà réalisés ont des débits en général faibles dont le débit moyen est de 1,96 m³/h (BDD du MHUR, 2021) et sont inégalement répartis. C'est aussi le cas de Liptako Gourma au Niger où la réussite de l'installation des points d'eau modernes est très aléatoire et aboutie généralement à de faibles débits d'eau (5 m³/h en moyenne) lorsque le forage est positif (Moussa, 2022). Aujourd'hui, le taux de desserte en eau potable dans la région est de 32% (Suez Consulting, 2017).

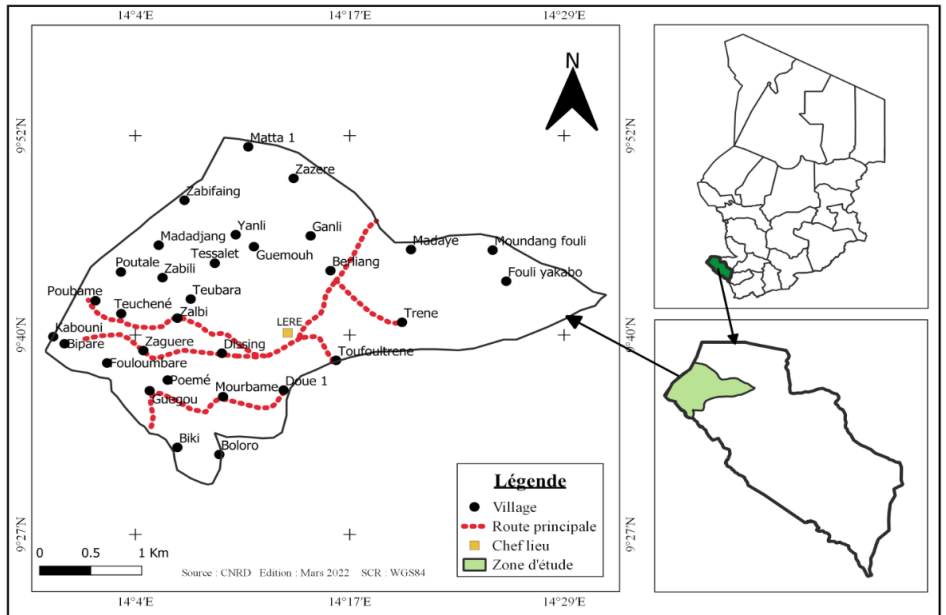
Pour mener à bien cette recherche, l'objectif fixé est de cartographier les zones favorables à l'implantation des forages productifs pour une bonne couverture territoriale et sociale des besoins en eau dans le département du Lac-Léré.

1. Matériels et méthodes

1.1. Situation géographique de la zone d'étude

Le Département du Lac-Léré se situe entre 14°00' et 14°30' de longitude Est et 9°30' et 9°53' de latitude Nord. Il est limité à l'Est par le Département de El-Ouaya, au Nord par le Département de Mayo Binder, à l'Ouest et au Sud par le Cameroun. Il renferme les villes de Léré, de Guegou, de Trené et 79 villages environnants (figure 1)

Figure 1: Carte de Localisation de la zone d'étude



Source : CNRD, 2022

Il couvre une superficie de 2712 Km² avec une population d'environ 103292 habitants (RGPH₂, 2009). Le climat est de type soudanien, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1200 mm et les températures varient avec des maxima qui dépassent 30°C et des

minimas qui descendent jusqu'à 15°C en moyenne.

La végétation se développe sur les sols peu évolués, les vertisols, les sols rouges tropicaux, les sols ferrugineux tropicaux, les sols hydromorphes et les sols halomorphes qui sont les quelques grands ensembles de sols dans la plaine de Lac-Léré (Guichard et al, (1961) ; Cheverry et al, (1970) ; Palouma, (2017)). Elle est constituée de forêt claire, des arbres et arbustes facilement pénétrables tels *qu'Acacia albida*, *Piliosqtima rufescens*, *Anogeissus leiocarpus*, *Acacia scorpioïde* et *Boswelli adalzielii*.

Le Lac de Léré se repose dans la dépression la plus basse de la région de Léré qui s'est formé probablement grâce aux mouvements thermiques (Walbadet, 1991). Il couvre une superficie d'environ 42 km² avec une profondeur de 3 à 8 m, le lac de Léré est le plus grand lac du bassin de Léré (Apelbo, 2014). Ses affluents sont les cours d'eaux tels que Mayo-Kebbi, Mayo binder, El Ouya et plusieurs d'autres cours d'eaux temporaires. Le Département de Lac Léré est constitué morphologiquement par un ensemble du relief caractérisé par une diversité d'unités géomorphologiques. On y rencontre les plateaux, des collines, des terrains plats, des plaines d'inondation, des cours d'eau et des lacs. L'activité principale de cette zone est l'agriculture pratiquée principalement par des Moundang, des Haoussa et des Peuls (Mbororos et foubé) qui sont des pasteurs transhumants. A cela s'ajoute la pêche, l'élevage et le commerce. D'après les études géologiques antérieures, le département de Lac-léré est situé dans la zone mobile centrale qui s'étend du Hoggar au Nord du craton du Congo et d'Ouest à l'Est du craton Ouest Africain à la zone mobile d'Afrique de l'Est (Teube, 2013). La chaîne panafricaine est représentée dans la zone d'étude par le massif du Mayo-kebbi. Ainsi on rencontre les granitoïdes précambriens (granite de Léré, granite de Zalbi, granodiorite de Guégou). Le substratum géologique du département de Lac-léré est un socle précambrien constitué de divers granites et de roches volcano-sédimentaires métamorphisés de l'orogénèse panafricaine, de roches sédimentaires détritiques et de filons de basalte du Crétacé (Kasser, 1998, Nontanovanh, 2002, Max V et al., 2007). Dans cette zone, les aquifères sont généralement

localisés, soit dans les failles, filons, dykes, contacts géologiques qui sont susceptibles de contenir les eaux souterraines.

1.2. Données

Il y a trois types des données utilisées pour cette recherche, les ressources documentaires, les données hydrogéologiques et les données satellites.

1.2.1. Les ressources documentaires

Les données documentaires sont collectées au niveau du Centre National de Recherche pour le Développement (CNRD), au Département de Géologie de la Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, au Centre de Documentation et de l'Information Géographique (CDIG) et sur l'internet.

1.2.2. Les données hydrogéologiques

Les informations hydrogéologiques sont en lien avec les caractéristiques des forages (profondeurs, coordonnées géographiques, altitudes, niveaux statiques, débits, épaisseur d'altération). Nous avons acquis, au total, cent vingt-trois (123) données sur les forages pour l'étude des différents paramètres au CDIG, au Projet GTZH.V-MK et le Programme PAEPA.

1.2.3. Données satellites

Une scène d'image Landsat 8 de path 184 et row 53, de résolution de 30 mètres et la panchromatique est 15 mètres du capteur OLI-TIRS, a été téléchargée sur le site américain de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Ces données sont acquises en date du 11-04-2021. Les données de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de résolution 30 mètres ont été téléchargées sur le site américain (<http://www.earthdata.nasa.gov>).

1.3. Matériels

Les outils mobilisés pour traiter ces données sont : Microsoft Excel a permis l'exportation des données GPS pour la spatialisation sous QGIS, Microsoft Word pour la saisie des données, QGIS 3.18.3

pour la réalisation des différentes cartes, QGIS Remonte Sensing pour le traitement des images. Le logiciel PCI Geomatica est utilisé pour l'extraction automatique des linéaments. Le Global Position System (GPS) pour les coordonnées des localités et des ouvrages hydrauliques (forages).

1.4. Méthodes

1.4.1.Extraction du réseau hydrographique

Les données SRTM ont été utilisées pour déterminer la pente par la fonction « Catchment » de Terrain Analysis - Hydrology sous SAGAGIS de ArcToolbox sous QGIS 3.18.3 pour réaliser la topographie (pente) de Lac Léré d'une part et d'autre part, pour extraire le réseau hydrographique de drainage parla fonction « Chanel Network » de Terrain Analysis - Channels sous SAGA GIS de ArcToolbox et analyser son influence sur la disponibilité de l'eau souterraine.

1.4.2.Extraction des linéaments

Pour extraire des linéaments, nous avons au préalable fait des traitements sur les différentes bandes monochromes (à niveau de gris) des images Landsat 8/ OLI afin d'obtenir les images multi-spectrales. Ces images ont subi différentes étapes de traitements. D'abord, le rehaussement de la qualité de l'image, ensuite l'élimination des bruits radiométriques dans les bandes OLI-TIRS par l'application du MNF. Dans le souci de cartographier l'essentiel des fractures ayant affectées le socle dans le département de Lac-Léré, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) à partir des images Landsat 8 dans le domaine du visible a été réalisée. L'analyse des textures s'effectue pour identifier les discontinuités dans les images. Cette analyse nécessite le calcul de paramètres d'homogénéité et de contraste pouvant être réalisés à partir des images Landsat 8 et l'ACP dans l'infrarouge. Ensuite, les linéaments ont été extraits de manière automatique avec le logiciel PCI Geomatica après traitements dans QGIS Remonte Sensing.

1.4.3. Validation des linéaments

Pour valider les linéaments qui ont été extraits de la manière automatique, nous les avons superposés sur les méga fractures dans l'objectif d'identifier toutes les failles majeures (méga fractures). Après cela, nous avons superposé les linéaments aux segments du réseau hydrographique dans le but de sélectionner les linéaments qui se superposent au réseau hydrographique ou qui s'en rapprochent.

1.4.4. Méthodes de la réalisation des cartes thématiques

Pour mener à bien cette recherche, nous avons utilisé la méthode de l'Analyse Multicritère. La détermination des zones favorables à l'implantation des forages d'eau dans le socle précambrien intègre de nombreuses données et doit nécessairement faire appel à une démarche rigoureuse pour une prise de décision d'où l'analyse multicritère.

A. L'analyse multicritère

L'analyse multicritère fait intervenir trois indicateurs à savoir la potentialité en eau souterraine, l'accessibilité et l'exploitabilité de la ressource.

Le principe consiste à utiliser des critères spécifiques, classer, codifier, pondérer et enfin les combiner pour décrire la variation spatiale de la potentialité, d'accessibilité et d'exploitabilité en ressources en eaux souterraines. Pour cela, les critères dont les indicateurs (potentialité, accessibilité et exploitabilité) ont été définis. Ils sont la géomorphologie (la pente), la géologie (l'épaisseur d'altération et densité de fracturation), l'hydrologie (la densité de drainage) et l'hydrogéologie (la profondeur forée, le débit d'exploitation, du niveau statique), la statistique (probabilité de succès). La probabilité de succès est déterminée en considérant qu'un ouvrage fournissant un débit supérieur ou égal à 4 m³/h a une probabilité de 100 % (Amine, 2014).

A1. Détermination de la potentialité

La potentialité est déterminée en tenant compte des facteurs topographiques, hydrologiques, et géologiques.

a) La topographie fait intervenir la notion de pente pour permettre une bonne infiltration.

➤ **La pente** d'un terrain permet d'identifier les zones à bonnes potentialités de recharge, en opposant les zones propices au ruissellement et les zones propices à l'infiltration. La zone de constitution de la ressource doit être fortement drainée par les réseaux hydrographiques pour favoriser l'infiltration. Cette pente est déterminée par la fonction « Catchment area » de Terrain analysis – Hydrology sous le logiciel QGIS en réalisant un Modèle d'Élévation Numérique (DEM) avec l'image satellitaire SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de résolution de 30 mètres qui nous donne une bonne vue de la surface topographique du terrain.

b) L'Hydrologie implique le paramètre important qui est la densité de drainage

➤ **La densité** de drainage est définie comme le rapport entre la somme des longueurs des tronçons de rivières par la surface du bassin. Laurent (1996) affirme que ce paramètre favorise le drainage des versants, réduit les infiltrations au détriment du ruissellement. La forte densité de drainage suppose une faible probabilité d'infiltration (Jourda, 2005).

c) La géologie fait intervenir le socle qui ne peut permettre une infiltration qu'à travers les fractures d'où la notion de densité de fractures. L'importance de l'épaisseur de la couche d'altérites permet de remplir sa fonction capacitive à travers une alimentation des aquifères subjacents.

- **Densité des fractures.** Ici, on ne retiendra que les linéaments qui ont subi tous les processus de validation. Ainsi, les traits linéaires doivent caractériser la fracturation de ce milieu fissuré. Les zones de fortes densités de fracturation sont des régions suffisamment broyées par les forces tectoniques, donc favorables à l'accumulation d'un important volume d'eau.
- **L'épaisseur d'altération** est déterminée à partir des coupes lithologiques (fiches techniques) des forages. Les altérites correspondent à la partie superficielle altérée des roches de socle. L'épaisseur d'altération est fonction de la nature lithologique, du climat et de la topographie. Dans les aquifères du socle, les altérites jouent le rôle capacitif et transmissif vers les réservoirs de fissure (Lachassagne et WYNS, 2005 ; WYNS, 2002).

Ainsi, plus les épaisseurs sont importantes, plus elles deviennent capacitives. Parfois, elles peuvent constituer de véritables réservoirs d'eau souterraine connectés à l'horizon fissuré qu'ils alimentent.

- **L'accessibilité** de la ressource en eau est déterminée en tenant compte de la profondeur de forage et la probabilité de succès.
- **La profondeur** est déterminée grâce aux coupes lithologiques (fiches techniques) des forages. Pour mettre en évidence la profondeur maximale, la relation entre le débit et la profondeur est faite afin de fournir un bon débit d'exploitation.
- **La probabilité de succès** est déterminée en considérant qu'un ouvrage fournissant un débit supérieur ou égal à 4 m³/h a une probabilité de 100 %. La ressource étant accessible, il s'agit ensuite de vérifier son exploitabilité.
- **L'exploitabilité de la ressource** est liée à sa productivité.

té et sa profondeur d'extraction. En ce sens qu'elles tiennent compte de deux critères mis en évidence, il s'agit du débit d'exploitation et le niveau statique (déterminés à partir des coups lithologiques (fiches techniques des forages).

En définitif, les critères que nous avons utilisés dans la définition des indicateurs sont la Pente, la Densité de fracturation, la Densité de drainage, l'Épaisseur d'altération, la Profondeur des ouvrages, la Probabilité de succès, Niveaux statiques et le Débit d'exploitation.

Après toutes ces étapes, les paramètres sont repartis conformément à leurs espaces et sont affectés par des valeurs proportionnellement à leurs poids.

A2. Calcul des entités statistiques

Pour ce travail de recherche, les données des forages collectées auprès de la CDIG et PAEPA, ont été utilisées pour établir une relation entre le débit d'exploitation et l'épaisseur d'altération. La méthode utilisée a permis de mettre en exergue l'épaisseur d'altération qui est favorable de produire un bon débit d'exploitation. Le calcul est fait pour produire des données fiables et compatibles à l'analyse spatiale dans le Système d'Information Géographique (SIG). Il comprend :

- La classification et standardisation des critères se basent sur les travaux de Youan (2016) ; Jourda et al., (2006). Cette classification consiste à regrouper leurs valeurs en des classes (très faible, faible, moyenne, forte et très forte) pour faciliter leur interprétation. Chaque indicateur devient à la fin, une entité avec des valeurs statistiques ;
- La pondération des critères se fait par la détermination des poids des critères et l'attribution des notes selon l'échelle de Saaty (1977). Elle se base sur des calculs mathématiques qui donnent des poids des critères dont la somme est égale à **1**. Ainsi, le calcul se fait comme suit :

$$V_p = \sqrt[n]{\prod_i^n g_i}$$

V_p = Vecteur propre ; n = Nombre du critère et g_i = Note du critère i
 Pour l'obtention du poids de chaque critère, nous avons divisé chaque vecteur propre par sa somme. Pour la carte de potentiel en eau, nous avons intégré tous les paramètres puis en faire la somme.

- L'agrégation des critères consiste à multiplier chaque facteur ou indicateur par son coefficient respectif et ensuite, additionner les résultats pour produire un indice d'aptitude.

B. Réalisation de la carte des zones favorables ou carte de potentialité pour l'implantation des forages

Cette cartographie fait intervenir plusieurs procédures de calculs. Pour réaliser les différentes cartes thématiques, les données statistiques sont converties en couche vecteur (Shapefile) permettant la réalisation de l'analyse spatiale par la fonction « Interpolation » de l'Analyse du Menu Raster sous le logiciel QGIS pour obtenir une couche raster (ou matrice) et exportée en image JPEG. Cette analyse spatiale est réalisée par l'utilisation de la fonction « Calculatrice » du Menu Raster sous le logiciel QGIS.

La carte d'accessibilité a été réalisée en utilisant la formule suivante :

Carte accessibilité = (carte des profondeurs x 0,75) + (carte des probabilités de succès x 0,25)

Pour réaliser la carte exploitabilité, la formule suivante a été utilisée

Carte exploitabilité = (carte des Débits x 0,75) + (carte des Niveau piézométrique x 0,25)

La carte de potentialité en eau souterraine est réalisée conformément à la formule suivante

Carte des potentialités = (carte Dd x 0,15) + (carte Df x 0,25) + (carte P x 0,5) + (carte Ea x 0,10)

Où Dd : Densité de drainage, **Df** : Densité de fracturation, **Ea** : Epaisseur d'altération, **P** : Probabilité de succès

Tous ces différents calculs conduits à la carte des zones potentielles pour l'implantation des forages dans le département de Lac Léré.

Tous ces travaux conduisent en amont aux résultats synthétiques suivants.

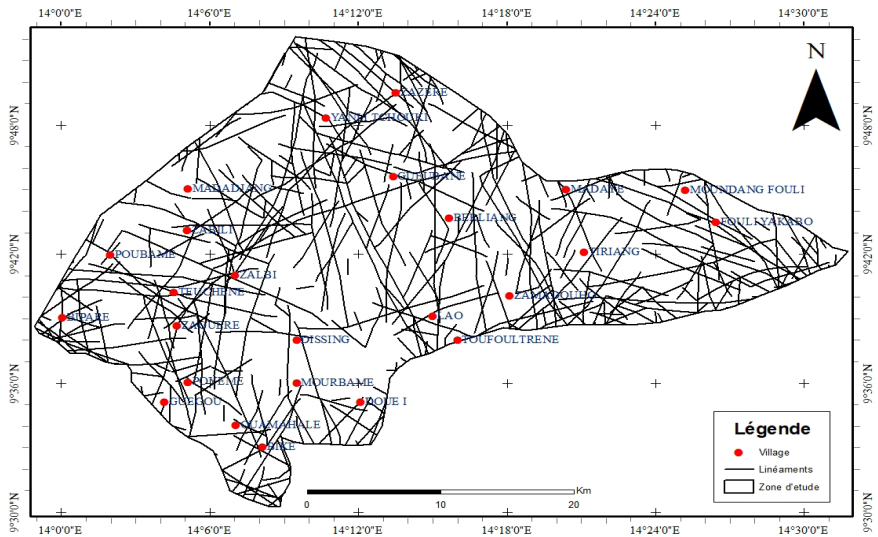
3. Résultats

Plusieurs résultats sont obtenus antérieurement que nous ne pouvons pas tous faire mention dans cet article. Néanmoins, toutes les démarches qui ont permis d'obtenir ce résultat, sont évoquées dans la méthodologie.

3.1. Carte des linéaments

L'analyse de cette carte montre que les linéaments présentent une répartition hétérogène. Le constat est que peu de ces linéaments sont assez kilométriques et les linéaments qui se croissent sont nombreux. Les linéaments qui se croissent sont observés dans presque toutes les localités mais moins dense dans le centre-sud du département (Figure. 2).

Figure 2 : Carte des linéaments (Source : Image Landsat8 du 11-04-2021, résolution 30 m,

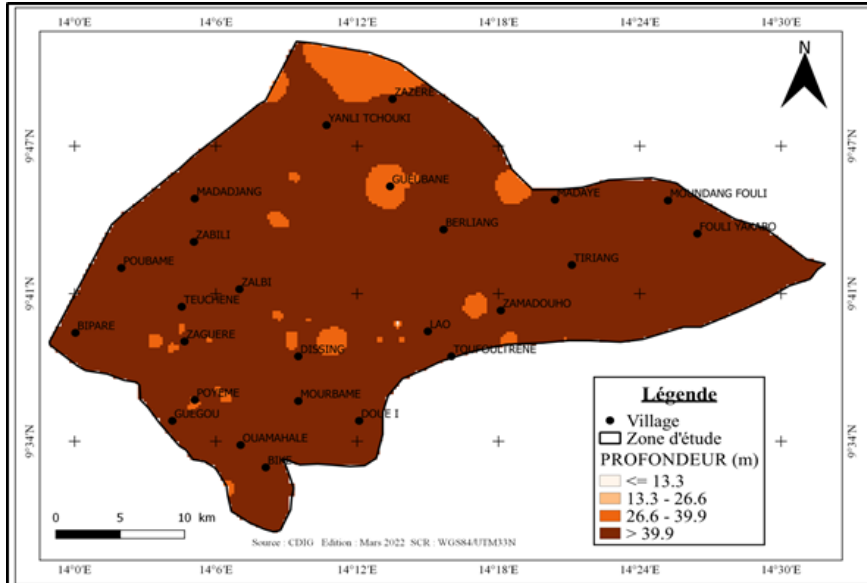


Site : <https://earthexplorer.usgs.gov>)

3.2. Carte des profondeurs des forages

L'analyse de cette carte nous permet de constater que la classe forte des profondeurs des forages (>39,9 m) occupe la majeure partie de la carte représentant un pourcentage 98,52%, cette tranche de profondeurs touche la majorité des localités de la Zone d'étude. La classe moyenne (26,6 – 39,9 m) représente 1,47% de la carte et concerne les localités de Gueubane, Poyemé. La classe faible (13,3 – 26,6 m) et Très faible (<13,3 m) représente 0,01% et est observée à l'ouest de Lao (Figure. 3).

Figure 3 : Carte de la profondeur Source : données CDIG

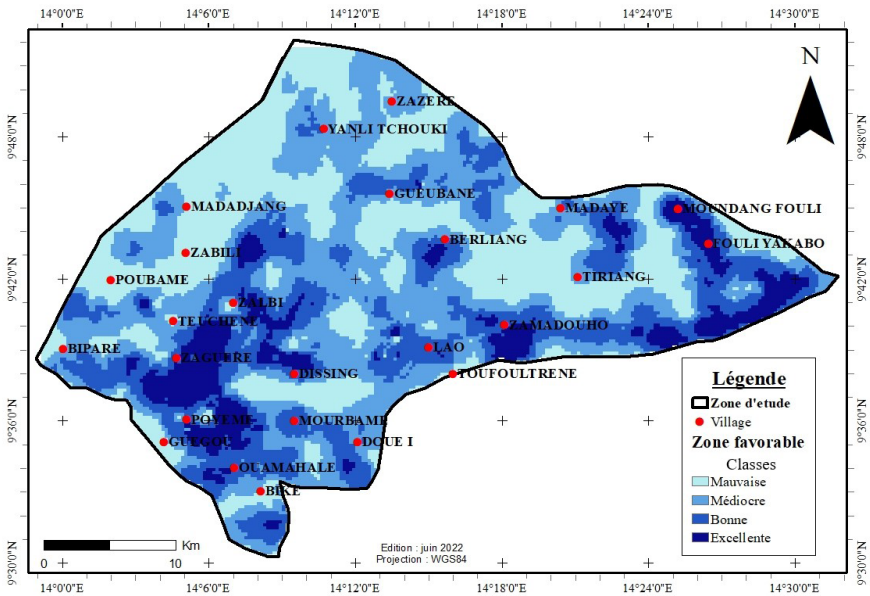


Source : données CDG

3.3. Carte des zones favorables à l'implantation des forages

Cette carte a été réalisée par la combinaison de la carte d'exploitabilité des eaux souterraines, celle des disponibilités et la carte d'accessibilité aux eaux souterraines.

Figure 4 : Carte des classes de zone favorable à l'implantation des forages



Source : Gouayé, 2020

La combinaison des cartes précédentes, nous a permis d'obtenir une carte de zone favorable à l'exploitation des eaux souterraine, l'analyse de cette carte produite nous permet de distinguer quatre classes : une classe médiocre (couleur bleu claire) dominant la zone d'étude soit 43,74%. Les localités concernées par cette classe sont : Tiriang (Trénè), Zazeré, Douel, Toufoultréné, Yanli, Guebané, etc. La deuxième classe en termes d'importance est la classe mauvaise (couleur bleu ciel) qui occupe 34,06%, elle couvre les localités de Zabili, Madadjang, Poubamé, Guegou, Biké, Teuchéné, etc. Ensuite vient la classe bonne (couleur bleu) couvrant la zone à hauteur de 15,05% ; elle touche les localités de Ouamahalé, Madaye, Poyémé, Dissing, Mourbamé, etc. Et enfin la classe excellente (couleur bleu foncée) qui reste la classe là moins représentée avec un pourcentage de 7,15% qui couvre les localités de Zagueré, Fouliyakabo et Moundanfouli.

Pour valider cette carte, nous avons superposé les fractures et les débits des forages réalisés par le programme PAEPA et le projet GTZH.V-MK.

4. Discussion

L'étude des rapports entre population et eau met en relief les problèmes relatifs à la pénurie d'eau et à l'inégalité répartition territoriale. D'après les analyses, le constat est qu'en général, qu'on n'accorde pas l'attention nécessaire aux processus démographiques, alors que les conséquences de la dynamique spatiale de la population sont observées. Les stratégies de gestion de cette importante ressource doivent être mises en place en tenant compte de l'accroissement de la population dans le temps et dans l'espace. A cela s'ajoute le taux de desserte qui baisse à cause des nombreuses pannes affectant les points d'eau. D'après les calculs faits, le taux d'accès à l'eau potable dans la zone d'étude est 27,06%. Dans cette zone, sur trois pompes villageoises réalisées, une à deux pompes sont en panne. A cela s'ajoute le vieillissement des ouvrages et la baisse du débit des forages dans certains villages, ce résultat confirme les conclusions du travail de (Kanohin Fulvie epse Otchoumou et al, 2012).

Nous constatons à travers la détermination de la productivité des aquifères que les débits sont élevés dans les forages dont la profondeur se situe entre 30 et 60 mètres. La profondeur maximale atteinte par les forages de la zone d'étude est 80 mètres et le minimal est de 20 mètres. Ce résultat confirme les conclusions des travaux de (Amine, 2014), (Kadéré, 2019) (Kouassi et al, 2012) et (Biémi, 1992) qui préconisent d'éviter les forages profonds puisque les fractures se referment à des grandes profondeurs.

Il a été constaté que les forages fournissant un bon débit ont une épaisseur d'altération variant entre 0,1 et 25 mètres pour une épaisseur maximale de 30 mètres. Par contre le résultat des travaux de (Youan Ta, 2008), (Gmaba et al, 2014), (Kouassi et al, 2012), et (Kadéré, 2019) confirme que les forages qui fournissent un bon débit

ont une épaisseur d'altération variant entre 10 et 35 mètres pour une épaisseur maximale de 45 mètres.

La carte des potentialités a été réalisée à partir d'une combinaison de la densité des fractures, densité de drainage, pente et l'épaisseur d'altération. Quatre classes des potentialités en eau souterraine ont été distinguées : mauvaise (30,76%), médiocre (40,04%), bonne (18,05%) et excellente 11,15%). La classe mauvaise et la classe médiocre sont dues à des faibles densités de fractures alors que la classe bonne et excellente relève d'une forte densité de fractures.

La carte des zones favorables a été élaborée par la combinaison des cartes des potentialités, d'accessibilité et d'exploitabilité. Les classes obtenues sont : mauvaise (34,06%), médiocre (43,74%), bonne (15,05%) et excellente (7,15%). D'une manière générale, nous constatons que les piedmonts constituent des zones favorables à l'implantation des forages du fait de leur topographie basse mais aussi de l'existence d'un réseau dense de fractures.

Conclusion

L'étude de la variabilité climatique, des relations épaisseurs d'altérites, débits d'exploitation, par rapport aux paramètres hydrodynamiques ont permis de mettre en évidence les potentialités en eaux souterraines dans notre zone d'étude. Il ressort que les eaux souterraines sont disponibles par endroits et généralement avec des probabilités d'exploitation faibles à cause de l'influence des plusieurs paramètres. La profondeur se situe entre 30 et 60 mètres. La profondeur maximale atteinte par les forages de la zone d'étude est 80 mètres et la minimale est de 20 mètres. L'épaisseur d'altérites semble influencer les débits d'exploitation. L'épaisseur d'altération les plus favorables sont généralement comprises entre 0,1 et 25 mètres.

La détermination des zones de disponibilité en eau souterraine a été rendue possible grâce à l'application combinée de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques. La car-

tographie des fractures a été faite sur les images Landsat 8 et a été couplée à des paramètres de forage pour confirmer les résultats de la carte de disponibilité en eau souterraine, ceci montre l'importance de la fracturation dans la productivité des aquifères de socle. Ainsi, les méthodes d'analyses multicritères appliquées intégrant l'altération, la fracturation, la pente et le drainage ont permis d'avoir des approches sur la variabilité spatiale de disponibilité en eaux souterraines dans la zone d'étude.

Les SIG et l'analyse multicritère ont des atouts énormes, Puisqu'ils apportent une contribution incontestable à la gestion des ressources en eau et les prises de décisions rationnelles. Néanmoins, ils présentent des limites. L'estimation des paramètres manque souvent de précision du fait de l'insuffisance ou de l'absence totale de données en certains endroits de la zone d'étude.

Il serait nécessaire de réaliser d'autres études en fusionnant les données optiques et radar pour améliorer la litho-structurale de la zone d'une part, et d'autre part l'utilisation des données des essais de pompages et géophysiques pour augmenter le champ des informations afin de déterminer les zones favorables et les futurs points d'implantation des forages. Enfin, Il est important également de faire une enquête démographique afin d'appréhender les points de vue des populations auxquelles seront destinés les points d'eau.

Références bibliographiques

Acworth Ian., 1987, “The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. Volume 20. Pages .Number 4. November 1987. Pages : 265 – 272

Amine Kariféne, 2014, *Cartographie par télédétection et SIG des zones favorables à l'implantation des forages dans la zone de socle : cas de la région de Guéra*. Mémoire de fin de cycle, d'Université d'Houphet Bogny en Côte d'Ivoire ; page 71

Apelbo Blaise, 2015, *Evaluation du niveau de contamination métallique des sédiments et poissons du lac de Léré (Sud- Ouest du Tchad)*. Mémoire de fin de cycle, d'Université de Ngaoundéré au Cameroun ; page 88.

Base des Données du Ministère de l'Hydraulique Urbaine et Rurale, 2021, Tchad

Biemi Jean, 1992, *Contribution de l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des Bassins subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire)*, Thèse d'État ès-Sciences naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 424 p.

Cheverry Claude, Fromaget Michel, 1970, Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance à 1/200000 de la république du Tchad, 32, 38 pages.

Courtois Nathalie, Patrick. Lachassagne, Robert Wyns, Raymonde Blanchin, Francis Bougaire, Sylvain Some et AïssataTapsoba, 2009, “Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso”. *Ground Water*, 48, 269-283”. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620>.

Dewandel Benoit, Patrick Lachassagne, Kamal Zaidi Faisal et Shekhar Chandra, 2011, “A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India”. *Hydrology Journal*,

405, 474-487.

Gnamba Franck Maxime, OgaYeï Marie Solange, Gngangne Théophile, Lasm Théolophile, Biémi Jean, Kouakou Yao Kouman Nestor, 2014, « Analyse de la productivité des aquifères fissurés du socle *paléoproterozoïque de la région de Katiola* ». European Scientific Journal February 2014 edition vol.10, No.5 ISSN : 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431

Guichard Edmond, Barbery Jean et Poisot Pierre, 1961, « *Etude pédologique de périmètre de reboisement de Léré* » ORSTOM, Centre de Recherche Tchadienne de N'Djamena ;

Guiné Amngar, 2016, *Caractérisation des paramètres physico-chimique des eaux souterraines ; implication pour l'évaluation des potentialités de ressources en eau du bassin hydrogéologique de la région du Lac Iro*(République du Tchad), Mémoire, 92 pages

Institut National de la Statistique, des Etudes Economiques et Démographiques (INSEED), 2009, « Rapport du deuxième recensement général de la population et de l'habitat (RGPH2, 2009) ». République du Tchad, 88 pages.

Jourda Jean Patrice, 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 et l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire* ». Thèse de Doctorat d'état, université de Cocody, Côte d'Ivoire 430pages ;

Jourda Jean Patrice, Djagoua Éric Valere, Saley Mahaman Bachir, Kouamé Kan Jean, et al., 2006, « *Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère et test de validation* ». RevTeledetect 5(4) : 339–357.

Kadéré Alafi., 2019, « *Apport des SIG et de la télédétec-*

tion dans la caractérisation des eaux souterraines en zone de socle : cas de la ville d'abéché et ses environs ». Mémoire de fin de cycle, d'Université de N'Djaména au Tchad, page 71

Kanohin Fulvie Epse Otchoumou, Saley Mahaman Bachir, Aké Gabriel Etienne et SavanéIssiaka, 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.

Kasser Mahamat Younous, 1998, « *Le précambrien tchadien : l'exemple du Mayo Kebbi* ». Revue scientifique du Tchad, CNAR, pp. 51-67.

Kouamé Koffi Fernand, Théophile Lasm, Jean-Raynald de Dreuzy, Armel Ghislain Akaffou, Olivier Bour et Philippe Davy, 2010, « Contribution d'un modèle hydrogéologique a fractures discrètes a l'étude des aquifères fractures du socle archéen de Touba (Nord-Ouest, Cote d'Ivoire) ». Revue. Scientifique. Eau, Côte d'Ivoire 23(1), 41-56.

Lachassagne Patrick, Robert Wynset Benoit Dewandel, 2011, « *The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes* ». Terra Nova, 10, 1365-3121.

Lachassagne Patrick. et Robert Wyls, 2005, « *Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application a la prospection et la gestion de la ressource en eau* ». Géosciences, 2, 32-37.

Laurent François, 1996, « Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau : Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des *Eaux* ». Thèse École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne et École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 355 p ;

Lienou Gaston, 2007, « *Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun* ». Thèse de doctorat. Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Yaoundé, Cameroun, 390 p.

Moussa Yayé (2022). *Stratégies d'adaptation des communautés rurales à la précarité hydrique dans la commune urbaine de Téra, dans le Liptako*. Nigérien. Niger Vertigo, 22(1), 1–19. . <https://doi.org/10.4000/vertigo.35455>

Marechal Jean-Christophe, Benoit Dewandelet Krishnaswamy Subrahmanyam, 2004, “*Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fissured layer of a hard rock aquifer*”. Water Resour. Res., 40, DOI: 10.1029/2004WR003137.

Marechal Jean-Christophe, Robert Wyns Patrick Lachassagne, Krishnaswamy Subrahmanyam et Frédéric Touchard, 2003, « Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissure des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération ». CR Geoscience., 335, 451- 460.

Max Vidal, Manoli Nontanovanh, Jean Louis Devineau, Jean Claude Doumnang Mbaïgane, Andre Pouclet, 2007, « Substratum géologique et partage des terres dans le sud du Tchad » 334 p.

Pias Jean et Barbery Jean, 1965,« *Notice explicative. Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000e. Feuille de Lac Iro-Djouna* », ORSTOM, n° 25, Paris, 98pages.

Pias Jean., 1970, « Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent ». ORSTOM, N° 43, Paris, 407 pages.

Pias Jean 1970, « *Carte pédologique du Tchad à 1/1000000* », O.R.S.T.O.M, n° 41- I, 209 pages.

Taylor Richard et Howard Ken, 2000, “*A tectono*

geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda". *Hydrogeology Journal*, 8, 279-294.

Saaty Thomas, 1977, "A scaling method for priority in hierarchical structures, journal of mathematical psychology", volume 15, p 234 – 281

Teube Désiré, 2013, « *Etude géologique et métallogénique de la région aurifère de Poémé (Sud-ouest du lac Léré)* », Mémoire de fin d'étude, Université de Ngaoundéré, Cameroun, 71 pages

Walbad et AïnaAppolos, 1991, « *Etude hydrologique du bassin versant du Mayo-kebbi* » ; Mémoire d'étude d'ingénieur d'application en hydrologie, Niamey, Niger, 222 pages.

Wolff, Jean-Pierre 1964, « Carte géologique de la République du Tchad au 1/1500000 », BRGM,

Wyns Robert, Baltassat Jean Michel, Lachassagne Patrick, Legchenko Anatoly., 1999, "Application of portion magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basementrocks (Brittany, France)". Bull. Soc. Géol. France, t. 175. WYNSR. 2002. Climat, eustatisme.