

Cartographie des zones de recharge des aquifères de fractures du département de Tanda par analyse multicritère (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)

Mapping of fracture aquifer recharge zones by multicriteria analysis in the department of Tanda (Northeast Ivory Coast)

Aimé KOUDOU^{1*}, Bernard ADIAFFI² & Kobenan Christophe KRA²

1. Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement, Département des Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire *(kdaime@yahoo.fr)
2. Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, Bd de l'Université, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

Résumé. L'identification des zones potentielles de recharge naturelle des aquifères contribue à l'orientation des campagnes d'implantation de forages à forte productivité. La présente étude a pour objectif de cartographier les zones susceptibles de faire l'objet de recharge naturelle des nappes de fractures du département de Tanda (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Elle est menée à partir de la compilation et du traitement de données satellitaires Landsat 8 et SRTM, de cartes géologique et topographique et de données de forages de la zone d'étude. Cela a abouti à la mise en place d'une base de données géospatiales basées sur des critères bien structurés (occupation du sol, densité de fracturation, pente, lithologie, densité de drainage, épaisseurs d'altérites), qui favorisent la recharge des aquifères. La combinaison de ces critères au sein d'un SIG permet d'obtenir la carte des zones potentielles de recharge des nappes de fractures du département de Tanda. Cette carte est validée à la fois par des teneurs de chlorure et des forages secs. La carte de synthèse ainsi obtenue est caractérisée par des zones de recharge très forte (17%) et forte (28%) qui s'étendent du Sud-Est au Sud-Ouest. Les zones de recharge moyenne (33%) s'identifient au Centre alors que les zones de recharge faible (22%) occupent le Nord du département. Cet outil d'aide à la prospection hydrogéologique oriente les décideurs dans l'implantation raisonnée des forages à forte productivité.

Mots-clés : Recharge naturelle, Analyse multicritère, SIG, Tanda, Côte d'Ivoire.

Abstract. The identification of potential zones of natural recharge of aquifers contributes to the orientation of campaigns for the site-selection of high productivity boreholes. The objective of this study is to map investigation areas that are likely to be zones of natural recharge of the fractured aquifers in the department of Tanda (northeastern Ivory Coast). This is carried out based on the compilation and processing of Landsat 8 and STRM satellite data, geological and topographic maps and data from boreholes of the study area. This resulted in the establishment of a geospatial database of well-structured criteria (land cover, fracture density, slope, lithology, drainage density, thicknesses of alterites), which augurs an aptitude for recharging. The combination of these criteria in a GIS made it possible to obtain a map of potential zones of recharge of fractured aquifers in the department of Tanda. This summary map, validated both by chloride contents and by dry boreholes, is characterized by very strong (17%) and strong (28%) recharge zones which extend from the South-East to the South-West. The medium recharge areas (33%) identify with the Center while the low recharge areas (22%) occupy the North of the department. This hydrogeological prospecting assistance tool guides decision-makers in the reasoned implementation of high productivity boreholes.

Keywords: Natural recharge, Multicriteria analysis, GIS, Tanda, Ivory Coast.

Abridged English Version

Nowadays, groundwater represents an undeniable source of supply, more extensive and more stable than surface water. It is more accessible to many users (Margat 1990, Lasm 2000, Braune & Xu 2010, Cobbing & Hiller 2019). It is also the subject of constant research around the world, in various soil and subsoil formations, using the most sophisticated technical tools. In most cases, this groundwater comes from precipitation infiltrated into the ground from openings in rocky material (pores or voids, or fractures). This phenomenon of infiltration of rain to supply underground reservoirs is qualified as the natural recharge of groundwater. This recharge can occur locally, from surface water bodies or from rain, in diffuse form through the unsaturated zone of the soil (Ibrahim 2013). Groundwater recharge estimation is both very complex and uncertain. Assessment of aquifer recharge rate is a fundamental importance for a sustainable exploitation.

In addition, aquifer recharge mechanism understanding is essential for water resource management (Mohamed 2012). Recharge has therefore been the study subject in several parts of the world (Koudjega *et al.* 2013, Huet 2015, Seguin *et al.* 2015, Siva Prasad & Venkateswara Rao 2018, Labrecque 2019), and on the West African continental crust (Etrillard 1994, Gaye & Edmunds 1996, Abdou Babaye 2012). In Ivory Coast, natural recharge area mapping was carried out by Assoma *et al.* (2012) in the Southeast of coastal aquifers, by Oularé *et al.* (2017) in the N'zo watershed, and by Aké *et al.* (2018) in Bonoua. Tanda is one of the northeast Ivory Coast departments situated between longitudes 2° 53'3" " and 3° 29'23" west and latitudes 7° 36'14" " and 8° 1'17" north. It covers an approximate area of 1,625 km² (Fig. 1). This department is located in a fractured hard-rock aquifer. Drilling productivity is difficult to predict in this crystalline and crystallophyllian hard-rocks environment, because it is controlled by many geological, morphological, structural and

hydrological factors (Jourda 2005, Jourda *et al.* 2015, Koudou *et al.* 2016, Anaba Onana *et al.* 2017). The Tanda department is also faced with strong population growth (rural and urban) and therefore an undeniable increase in water needs for various uses, mainly domestic, in a context of climate change and sustainable development. Exploitation of aquifers in order to provide the population with sufficient and good quality water remains a topical issue in this part of Ivory Coast. That inevitably requires the perfect identification of potential aquifer natural recharge areas. Knowledge of recharge areas helps guide campaigns to install high productivity boreholes. In addition, it makes it possible to identify areas sensitive to infiltration in order to protect them against possible pollutants. The main objective of this study is to highlight potential areas of natural recharge in the fractured hard-rock aquifers of the Tanda department by multicriteria analysis and chloride validation coupled with dry boreholes.

A multidisciplinary approach (remote sensing, multicriteria analysis and geographic information systems) has been adopted. The study was carried out from the compilation and processing of Landsat 8 and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) satellite data, geological and topographic maps and data from boreholes of the study area. It consisted in setting up a well-structured geospatial database, and in modeling all the elements constituting the physical environment within a GIS. The database includes study area lithology, land cover, fracture density, drainage density, slope and alterite thickness. These criteria favor fractured hard-rock aquifer recharge. They were obtained differently.

Lithology

The Tanda department is covered by a complex set of geological formations (Fig. 2) grouped into two large distinct domains: the Quaternary domain and the Paleoproterozoic domain (Siméon *et al.* 1995). The Quaternary domain formation is the most recent and is characterized by the lateritic cuirass, which constitutes a lateritic alteration mantle. Laterites represent all the loose or hardened materials that make up the soils, the surface horizons as well as the deep horizons of the weathering profiles (Zeade *et al.* 1995). The Paleoproterozoic domain includes three different formations:

- Tarkwaian formations consisting mainly of sandstones and arkoses of Koun-Tanda and Zanzan, in which are included conglomerates and tuffs;
- sedimentary and volcano-sedimentary formations, which group together undifferentiated volcano-sedimentary schists, calcochloritoschists, amphibole and chlorite schists and predominantly pelitic schists, which are the most common in this group.
- intrusive formations which include syntectonic granitoids (granodiorites, porphyroid granodiorites) and posttectonic intrusive formations (metatonalite, microdiorite and microgranite) (Tempier 1969). The suitability for infiltration is variable depending on the different geological or lithological formations. While lateritic crusts contribute unfavorably to the recharge of aquifers, meta-arenites and sandstones contribute very favorably.

Land cover

The Oli image of Landsat 8 was the subject of a pre-processing (extraction of the study area) and digital processing of the image of the study area in view to map the land cover. A series of applications related to vegetation indices (Normalized Vegetation Index (NDVI), Soil Gloss Index (IB) and Moisture Index (IW)), Principal Component Analysis

and color compositions of bands 8, 6 and 5 result in derived images, allowing a good spectral discrimination of the different types of land cover in general, and in particular of plant cover (Girard & Girard 1999, N'da 2007). The maximum likelihood classification method is applied to facilitate the differentiation of spectral signatures of ground objects. This classification is evaluated by the various performance tests (the confusion matrix, the overall precision and the kappa coefficient). A 3×3 median filter is applied to the land cover map to reduce intra-class heterogeneity.

Fracture density

The digital processing of the satellite image of the study area made it possible to map fractures of the Tanda department. This treatment consisted first of all in the application of different enhancement techniques (dynamic spreads, band ratios and normalized indices, principal component analyzes and colored compositions) in order to improve the visual quality of the image. This resulted in several enhanced images of the study area. To these, the Sobel 7×7 directional filter was applied following the N-S, E-W, NE-SW and NW-SE directions, with the aim of accentuating the discontinuities-images or lineaments of the study area. From a visual analysis, the interpretation and the recording of these lineaments were facilitated manually. The lineaments were materialized by straight or curved lines. In order to validate the structural lineaments or fractures in the study area, the major kilometeric lineaments were superimposed on the positive flow boreholes in the study area. This resulted in the obtaining of structural lineaments or major open and hydraulically active fractures. The fracture map of the Tanda department has finally been drawn up. Fractures of Tanda department are discriminated in number and in cumulative lengths according to their orientation by angular crescent of 10 degrees on a directional rosette. Fracture maps were discretized into regular square meshes of 5×5 km², well suited to the study area. The cumulative fracture lengths per mesh allowed to generate the fracture density map by interpolation according to the IDW technique.

Drainage density

The hydrographic network of the Tanda department is digitized from the topographic map. The vector file is subjected to the same processing as that of fractures to design the drainage density map.

Alterites thickness

Alterites thicknesses in the Tanda department are determined by the difference between the total depth of the borehole and the depth of the base of the wells. This parameter, linked to the boreholes coordinates of the study area, made it possible to generate by interpolation according to IDW alterites thickness map.

Slopes

The slope of the study area is automatically generated from the Digital Elevation Model (DEM). This is obtained from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data with a resolution of 30 m.

These criteria favor the recharge process in fractured aquifers. They are classified to discriminate the level of recharge ability. They are also standardized for a good multicriteria analysis (Jourda 2005). These criteria are also weighted according to their importance in recharging suitability. The weighting values were determined according

to the Multicriteria Hierarchy Method of Saaty (1977). They were developed by Koudou *et al.* (2010). These values vary between 0 and 1 and their sum is equal to 1. The Table 1 sets out the criteria influencing the recharging process which is classified, standardized and weighted. Combination of criteria or thematic maps that promote the recharge process in fractured aquifers is carried out in the WGS 84 cartographic reference system of the UTM zone 30N system. It is carried out by full aggregation by weighting (Joerin 1995, Savané 1997, Saley 2003, Martin *et al.* 2004, Jourda 2005, Koudou *et al.* 2010, Assoma *et al.* 2012, Koudou 2013, Koudou *et al.* 2013). This aggregation consists of the summation of the standardized and weighted values of each criterion involved in the development of recharge areas. The recharge aptitude index obtained is plotted in space and reclassified into four classes (Weak, Medium, Strong and Very strong) for better readability and a good interpretation of the fractured aquifer recharge area map. The chloride contents and the dry boreholes are superimposed on the spatial modeling map of the fractured aquifer recharge areas of Tanda for its validation. Figure 5 illustrates the methodology flowchart for recharge area mapping of hard-rock aquifers in the Tanda department.

Several thematic maps (land cover (Fig. 6), fractures (Fig. 7), fracture density (Fig. 8), drainage density (Fig. 9), alterites

thickness (Fig. 10), slope (Fig. 11)) of the Tanda department have been developed. The combination of these maps in a GIS made it possible to obtain a fractured aquifer potential recharge areas map (Fig. 12) of the Tanda department. This synthetic map is characterized by very strong (17%) and strong (28%) recharge areas which extend from the Southeast to the Southwest. Medium recharge areas (33%) are identified in the Center while weak recharge areas (22%) occupy the North of the department. Identification of strong and very strong recharge areas in the Tanda department fractured aquifers does not certify a 100% aquifer recharge rate, even if the forecast seems strong. Chloride contents of the Tanda department boreholes are low. Even if they do not cover the study area homogeneously, they nevertheless reflect the recharge in the department. Superimposition of dry boreholes in areas of weak recharge would reflect an absence of recharge in the north of the department. The validation of the Tanda department recharge area map could be improved by using carbon-14 activities (Adiaffi 2008, Adiaffi *et al.* 2009, Assoma *et al.* 2012). The fact remains that the map of recharge areas remains a decision-making tool likely to help the decision-maker in the establishment of high productivity boreholes for the water supply of the populations. It is therefore a strategic tool for hydrogeological prospecting (Assoma *et al.* 2012).

INTRODUCTION

Les eaux souterraines représentent aujourd'hui une source indéniable d'approvisionnement plus extensive et plus stable que les eaux de surface, et plus à la portée de nombreux usagers (Margat 1990, Lasm 2000, Braune & Xu 2010, Cobbing & Hiller 2019). Elles font l'objet permanent de recherches dans diverses formations du sol et du sous-sol, avec des moyens techniques les plus sophistiqués possibles. Ces eaux souterraines proviennent, dans la majorité des cas, de précipitations infiltrées dans le sol à partir des ouvertures de matériaux rocheux (pores ou vides, ou fractures) qui alimentent en partie les réserves d'eaux souterraines. Ce phénomène d'infiltration de la pluie pour alimenter les réservoirs souterrains est qualifié de recharge naturelle des nappes souterraines. Cette recharge peut se produire localement, des plans d'eau de surface ou de la précipitation sous forme diffuse, à travers la zone non saturée du sol (Ibrahim 2013). L'estimation de cette recharge des nappes est à la fois très complexe et incertaine. Toute une panoplie de méthodes à son étude a été développée à ce jour (Scanlon *et al.* 2002, Sophocleous 2004, Rivard *et al.* 2014, Huet 2015). La considérable incertitude scientifique dont souffrent toutes les méthodes dans la quantification des composantes individuelles de la recharge est un fait avéré (Haouchine *et al.* 2010). Au regard de la durabilité de l'exploitation de la ressource en eau souterraine, l'évaluation du taux de recharge des aquifères est d'une importance fondamentale. Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de recharge des aquifères est essentielle pour la gestion intégrée des ressources en eau (Mohamed 2012). La recharge a donc fait l'objet d'étude dans plusieurs parties du monde en général (Koudjega *et al.* 2013, Huet 2015, Seguin *et al.* 2015, Siva Prasad & Venkateswara Rao 2018, Labrecque 2019) et sur le craton Ouest africain en particulier (Etrillard 1994, Gaye & Edmunds 1996, Abdou Babaye 2012). En Côte d'Ivoire, la cartographie des zones de recharge naturelle a été effectuée par Assoma *et al.* (2012) dans les aquifères côtiers du Sud-Est, Oularé *et al.* (2017) dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest et Aké *et al.* (2018) à Bonoua dans le Sud-Est du pays.

Tanda est un département du Nord-Est de la Côte d'Ivoire qui couvre une superficie d'environ 1625 km², et qui est situé en zone complexe de socle fracturé. La productivité des forages est difficilement prévisible dans cet environnement de socle cristallin et cristallophyllien parce qu'elle est contrôlée par de nombreux facteurs d'ordre géologique, morphologique, structuraux, hydrologique (Jourda 2005, Jourda *et al.* 2015, Koudou *et al.* 2016, Anaba Onana *et al.* 2017). Tanda est aussi caractérisé par un climat de type tropical humide de transition. La pluviométrie du département, avec une moyenne interannuelle estimée à 920 mm (Coulibaly 2014), a une tendance déficitaire par rapport à celle des régions de Bondoukou et Yamoussoukro de même climat, et qui est de l'ordre respectivement de 1119 mm (Youan Ta 2008) et 1152,4 mm (Kouamé 2005). Ce département est confronté à une forte croissance de la population (rurale et urbaine) et donc à un accroissement indéniable des besoins en eau pour les divers usages, principalement domestiques, dans un contexte de changement climatique et de développement durable. L'exploitation des nappes en vue de fournir à la population de l'eau en quantité suffisante et de bonne qualité reste donc d'actualité dans cette partie de la Côte d'Ivoire. Cela passe inévitablement par la parfaite identification des zones potentielles de recharges naturelles des aquifères. La connaissance des zones de recharge contribue à l'orientation des campagnes d'implantation de forages à forte productivité. Par ailleurs, elle permet d'identifier les zones sensibles à l'infiltration afin de les protéger contre d'éventuels polluants.

Hormis les travaux de Youan Ta (2008) sur la prospection hydrogéologique dans la région de Bondoukou, et ceux de Kouakou *et al.* (2012) et Coulibaly *et al.* (2014) respectivement sur la recherche d'eau souterraine et la localisation des aquifères de la région de Tanda à partir de la méthode de résistivité électrique, aucune étude spécifique sur la cartographie des zones de recharge des aquifères n'a encore été menée dans cette région. La présente étude a pour objectif de mettre en évidence les zones potentielles susceptibles de faire l'objet de recharge naturelle dans les nappes fracturées de socle du département de Tanda par analyse multicritère et validation au chlorure couplée aux forages

secs. Il s'agit d'effectuer une analyse synergique dans un SIG (Systèmes d'Information Géographiques) de paramètres environnementaux et physiographiques qui caractérisent le milieu (géologie, occupation du sol, densité de fracturation, densité de drainage, topographie, etc.) et qui augurent d'une certaine aptitude à la recharge des eaux souterraines dans cet environnement complexe de socle fracturé de la région de Tanda. La validation des zones de recharge est effectuée à partir des teneurs en chlorure échantillonnées dans les eaux de forages et aussi à partir des forages secs. En fait, le chlorure utilisé comme traceur, est un élément ubiquiste présent dans toutes les eaux naturelles, persistant et stable, et doté d'une mobilité proche de la mobilité des molécules d'eau (Herczeg & Edmunds 2000, Chantry 2003).

L'outil SIG, de par ses fonctionnalités entre autres d'intégration de données diverses, facilite la mise en place de la base de données et la restitution cartographique des zones de recharge du département de Tanda.

MATERIEL ET METHODOLOGIE

Présentation de la zone d'étude

Situé au Nord-Est de la Côte d'Ivoire plus précisément dans la région du Gontougo, le département de Tanda est localisé entre les longitudes 2°53'3" et 3°29'23" Ouest et les latitudes 7°36'14" et 8°1'17" Nord. Il est limité au nord par le département de Bondoukou, au sud par le département de Koun-fao, à l'est par le département de Transua et à l'ouest par le département de Sandégué. Le département de Tanda regroupe quatre sous-préfectures : Tanda, Diamba, Tchèdio et d'Amanvi. Il couvre une superficie de 1625 km² (Fig. 1).

Sur le plan géologique, le département est couvert par un ensemble complexe de formations géologiques (Fig. 2) regroupées en deux grands domaines distincts : le domaine quaternaire et le domaine paléoprotérozoïque (Siméon *et al.* 1995). La formation du domaine quaternaire est la plus récente. Elle est caractérisée par la cuirasse latéritique qui constitue un manteau d'altération latéritique. Les latérites représentent tous les matériaux meubles ou indurés qui constituent les sols, les horizons superficiels, ainsi que les horizons profonds des profils d'altération (Zeade *et al.* 1995). Le domaine paléoprotérozoïque regroupe trois formations différentes :

- les formations tarkwaïennes constituées essentiellement des grès et arkoses de Koun-Tanda et de Zanzan, dans lesquels sont inclus des conglomérats et tufs ;

- les formations sédimentaires et volcano-sédimentaires qui regroupent les schistes volcano-sédimentaires indifférenciés, les calcochloritoschistes, les schistes à amphibole et chlorite et les schistes à dominante pélitique qui sont les plus rencontrés dans cet ensemble. Les ensembles volcaniques (métadolérites et métamicrogabbros) affleurent en plusieurs endroits au sein des formations. A côté de ceux-ci, d'autres formations telles que les métagabbros et les métarhyolites, affleurent sur de très petites surfaces. Soulé de Lafont (1955) apporte des précisions lithostratigraphiques et individualise, au sein d'un complexe volcano-sédimentaire, des formations détritiques (quartzites, arkoses, grès) et des termes plutono-volcaniques (andésites, gabbros, amphibolites).

- les formations intrusives qui regroupent les granitoïdes syntectoniques (granodiorites, granodiorites porphyroïdes) et les formations intrusives posttectoniques (métatonalite, microdiorite et microgranite) (Tempier 1969).

Toutes ces roches sont enfouies sous une épaisse couverture d'altération et dont la nature est identifiée à travers des coupes types de forages établis pendant les campagnes d'hydraulique urbaine (Fig. 3). L'aptitude à l'infiltration est variable suivant les différentes formations géologiques ou lithologiques. Alors que les cuirasses latéritiques contribuent défavorablement à la recharge des aquifères, les métarénites et les grès y contribuent très favorablement (Haouchine *et al.* 2010, Oularé *et al.*, 2017).

Sur le plan hydrogéologique, le modèle conceptuel d'aquifère de socle (Fig. 4), généralement admis (Wyns *et al.* 2002), caractérise celui du département de Tanda. Il comprend deux types d'aquifères : les aquifères superficiels (altérites) et les aquifères profonds (horizon fissuré et socle). Ces aquifères établissent une interconnexion. Ils constituent de ce fait un seul aquifère. Les premiers aquifères (les altérites) sont des milieux poreux. Ils présentent une bonne porosité mais une faible perméabilité. Ils jouent un rôle capacitif ou de stockage (Maréchal *et al.* 2004). Quant aux seconds aquifères, ils assurent une fonction conductrice grâce aux fissures et fractures (Lachassagne *et al.* 2001).

Morphologiquement, les plaines constituent la majeure partie du relief du département de Tanda. Les plaines littorales (0 à 100 m d'altitude) s'observent le long de la Comoé et de ses principaux affluents (Bayakokoré et N'djoré), alors que le reste du territoire est caractérisé plus généralement par des plaines intérieures (200 à 300 m).

Sur le plan pédologique, les sols sont d'une manière générale ferrallitiques mais avec parfois une présence de sols bruns et hydromorphes. Ils sont majoritairement gravillonnaires dans la partie forestière du département de Tanda, à la limite de Koun-fao, de Transua.

Le climat qui règne dans le département est du type tropical humide de transition (Coulibaly 2014), caractérisé par quatre saisons : une grande saison sèche allant de novembre à mars, une grande saison des pluies allant d'avril à juin, une petite saison sèche couvrant les mois de juillet et août, et une petite saison de pluies intervenant aux mois de septembre et octobre. La pluviosité annuelle du département est de 1088,6 mm. La moyenne interannuelle des températures est de 26,1°C (Coulibaly 2014).

Le département de Tanda est situé dans une zone où la forêt dense semi-décidue et la savane arbustive ou arborée coexistent et s'interpénètrent. Il fait partie du bassin versant de la Comoé et est drainé par un réseau hydrographique tributaire de ses principaux affluents qui sont le Bayakokoré et le Bayafoufoué. Ces cours d'eau prennent leur source dans les départements de Tanda et Bondoukou.

La population du département est estimée à 77555 habitants (RGPH 2014) et est constituée d'autochtones Abron et Koulango, Agni à la pointe sud (Koun-fao), et de quelques allochtones Mossi. L'économie du département est exclusivement basée sur l'agriculture.

Données et matériel

L'étude a nécessité l'utilisation de plusieurs données de type, de source et de format différents. Il s'agit de :

- 01 image satellitaire orthorectifiée OLI de Landsat 8 de la scène 195-55, prise le 22 février 2019, et téléchargée à partir du site internet américain <http://glovis.usgs.gov/>. Cette image, prise en saison sèche dans la zone d'étude, est dépourvue de nuages. Elle est de bonne qualité radiométrique.

- 02 coupures mosaïquées des données MNE (Modèle Numérique d'Élévation) (n07_w003 ; n07_w004 ; n08_w004) de résolution spatiale 30 m téléchargées sur le site américain <ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>. Elles sont issues de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography and Mapping) du 11 février 2000.

- cartes géologiques et topographiques au 1/200 000 des degrés carrés de Nassian et d'Agnibilékro Kouamé-Dari (Siméon *et al.* 1995) établies respectivement par Géomines (1982) et le Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN).

- 03 base de données de forages contenant 45 forages dont 21 forages secs, fournie par la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) de Bondoukou. Les informations contenues dans la base de données sont la profondeur totale de foration, la profondeur du socle, les arrivées d'eau 1 et 2, le niveau statique, le débit d'exploitation et les coordonnées géographiques des points de forages. Une campagne d'échantillonnage d'eau de 12 forages, effectuée sur le terrain dans le département de Tanda du 23 au 29 avril 2019, a complété les quelques mesures anciennes. Les échantillons prélevés, ont été analysés au laboratoire du Centre de Recherche Océanographique d'Abidjan (CRO) afin de mesurer les teneurs des ions majeurs dont celui du chlorure.

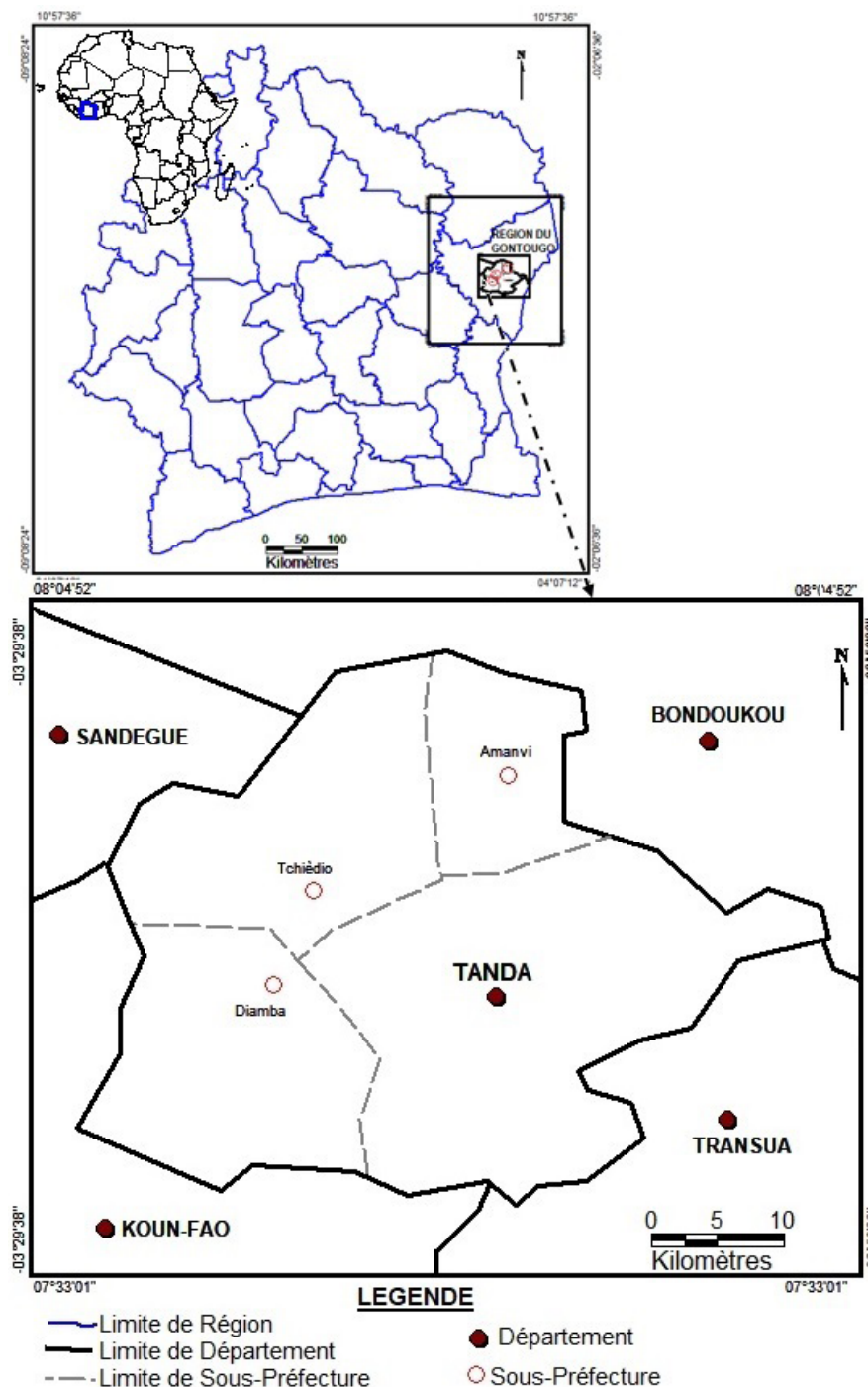


Figure 1. Localisation du département de Tanda.

Figure 1. Location of the department of Tanda.

Ces données ont fait l'objet d'une compilation et de traitements divers à partir de logiciels appropriés en vue de générer d'autres informations. Envi 5.3 a été utilisé pour le traitement des images satellitaires. Linwin 2.0 a permis le traitement des linéaments structuraux. MapInfo 12.0 a servi pour la numérisation des cartes. Microsoft office Excel 2013 a facilité la réalisation de graphique et de tableau. Et ArcGis 10.5 a servi de plate-forme pour la constitution de la base de données géospatiales et le croisement des cartes thématiques au sein du SIG.

Approche méthodologique

La cartographie des zones de recharge du département de Tanda a consisté à mettre en place une base de données géospatiales bien structurées, et à modéliser l'ensemble des éléments constituant le milieu physique au sein d'un SIG. La base de données regroupe, outre la lithologie de la zone d'étude, les critères d'occupation du sol, de densité de fractures, de densité de drainage, de pente, d'épaisseurs d'altérites dérivés du traitement de données diverses. Ces critères favorisent la recharge des aquifères fracturés de socle.

L'occupation du sol

Elle conditionne le rythme de recharge des aquifères par les eaux pluviales. Alors que la couverture végétale améliore énormément la recharge en favorisant le confinement de l'eau dans le sol, empêchant ainsi l'évaporation directe, les surfaces imperméables (bâtiments, routes, etc.) retardent considérablement le processus de recharge (Bou Kheir *et al.* 2003).

L'image Oli de Landsat 8 a fait l'objet d'un prétraitement (extraction de la zone d'étude) et d'un traitement numérique de l'image de la zone d'étude en vue de cartographier l'occupation du sol. Une série d'applications en rapport avec les indices de végétation (Indice de Végétation Normalisé (NDVI), Indice de Brillance (IB) des sols et Indice d'Humidité (IW)), l'Analyse en Composantes Principales et les compositions colorées des bandes 8, 6 et 5 aboutissent à des images dérivées

permettant une bonne discrimination spectrale des différents types d'occupation du sol en général et de la couverture végétale en particulier (Girard & Girard 1999, N'da 2007). La méthode de classification par maximum de vraisemblance est appliquée pour faciliter la différenciation de signatures spectrales des objets au sol. Cette classification est évaluée par les différents tests de performances qui sont la matrice de confusion, la précision globale et le coefficient kappa. Un filtre médian 3×3 est appliqué à la carte d'occupation du sol pour réduire l'hétérogénéité intra-classes.

La densité de fracturation

Une forte densité de fractures traduit une importante infiltration dans ce milieu (Sener *et al.* 2005), facilitant ainsi l'identification des zones potentielles de recharge en milieu de socle fracturé (Krishnamurthy *et al.* 1996).

Le traitement numérique de l'image satellitaire de la zone d'étude a permis de cartographier la fracturation du département de Tanda. Ce traitement a consisté d'abord en l'application de différentes techniques de rehaussement (étalements dynamiques, rapports de bandes et indices normalisés, analyses en composantes principales et compositions colorées) en vue d'améliorer la qualité visuelle de l'image. Cela a abouti à l'obtention de plusieurs images rehaussées de la zone d'étude. A ces dernières, ont été appliqué le filtre directionnel de Sobel 7×7 suivant les directions N-S, E-O, NE-SO et NO-SE, dans le but d'accentuer les discontinuités-images ou linéaments de la zone d'étude. A partir d'une analyse visuelle, l'interprétation et le relevé de ces linéaments ont été facilités manuellement. Les linéaments ont été matérialisés par des lignes droites ou courbes. En guise de validation des linéaments structuraux ou fractures de la zone d'étude, les linéaments majeurs d'ordre kilométriques ont été superposés aux forages à débit d'exploitation positif de la zone d'étude. Cela a abouti à l'obtention des linéaments structuraux ou fractures majeurs ouvertes et hydrauliquement actives. La carte de fracturation du département de Tanda a finalement été élaborée.

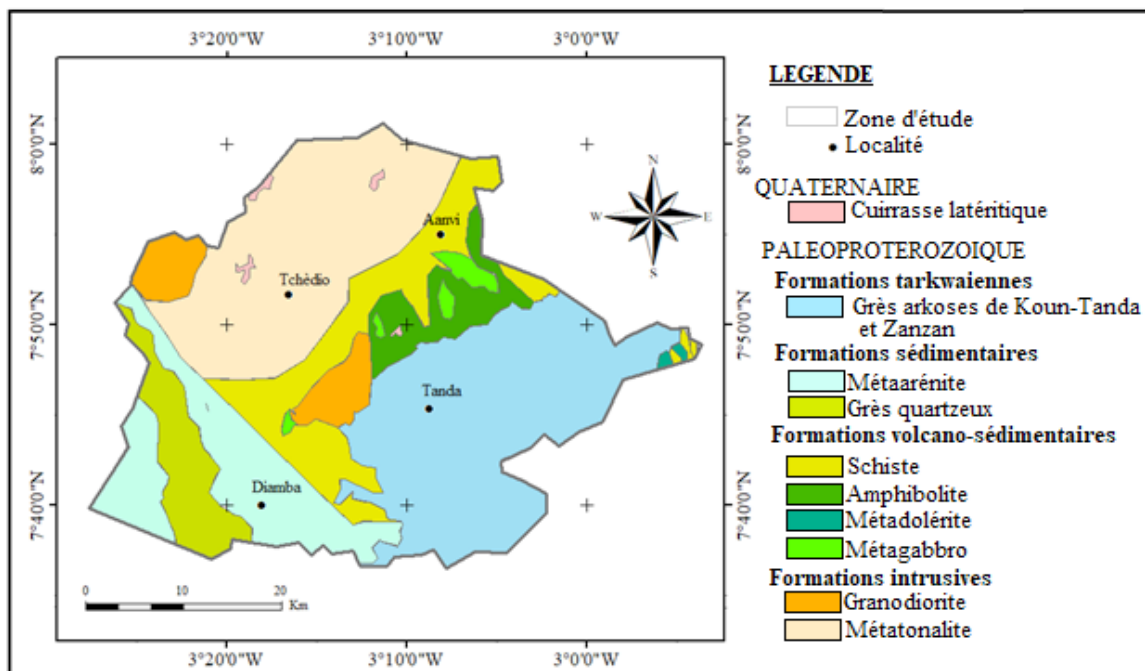


Figure 2. Carte géologique du département de Tanda (Siméon *et al.* 1995, Zeade *et al.* 1995) modifiée.

Figure 2. Geological map of the Tanda department of (Siméon *et al.* 1995; Zeade *et al.* 1995) modified.

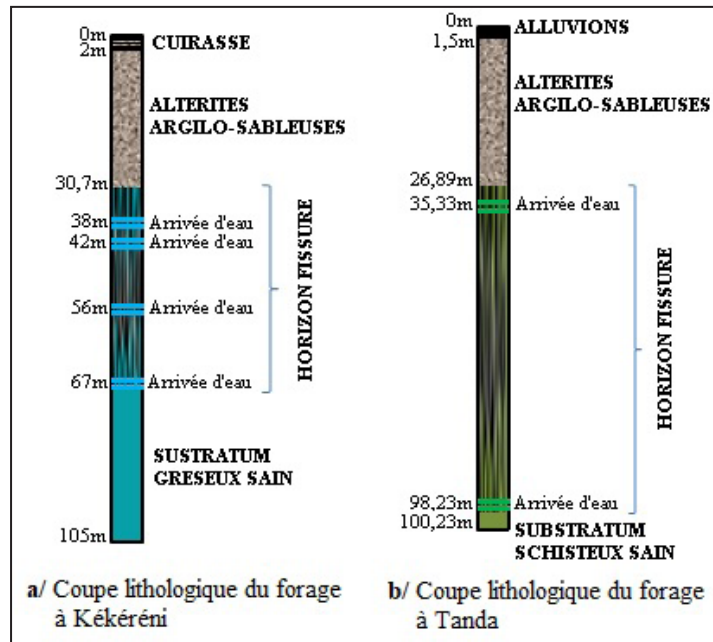


Figure 3. Coupes lithologiques de forages dans le département de Tanda (Kouakou *et al.* 2012).

Figure 3. Boreholes lithological logs in the Tanda department (Kouakou *et al.* 2012).

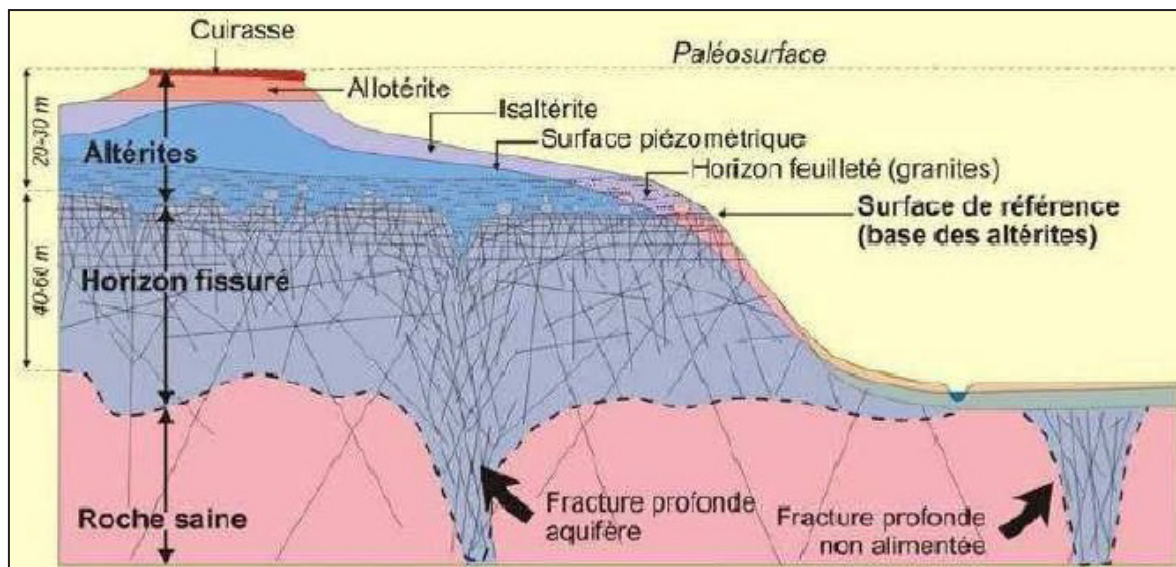


Figure 4. Modèle conceptuel d'un aquifère de socle (modifié par Wyns *et al.* 2002).

Figure 4. Conceptual model of a hard-rock aquifer (modified from Wyns *et al.* 2002).

Les fractures du département de Tanda sont discriminées en nombre et en longueurs cumulées en fonction de leur orientation par croissant angulaire de 10 degrés sur une rosace directionnelle à partir du logiciel Linwin 2.0. Ce même logiciel permet de discrétiser la carte de fracturation en mailles régulières carrés de 5×5 km², bien adaptées à la zone d'étude. Les longueurs cumulées de fractures par maille sont intégrées au logiciel ArcGis 10.5 pour générer la carte de densité de fracturation par interpolation selon la technique IDW.

La densité de drainage

Elle conditionne l'infiltration de l'eau dans les aquifères d'une région (Nouayti *et al.* 2017). La forte densité de drainage occasionne un ruissellement important et par conséquent, une faible quantité d'eau disponible pour la recharge des aquifères

(Langevin *et al.* 1989, Oularé *et al.* 2017). En milieu de socle cristallin, une forte densité de drainage en milieu de socle fracturé indique une grande perméabilité de la lithologie, elle-même contrôlée par la nature et le degré de fracturation des roches sous-adjacentes ou affleurantes (Edet *et al.* 1998). Le réseau hydrographique du département de Tanda est numérisé à partir de la carte topographique au 1/200 000. Le fichier vectoriel est soumis au même traitement que celui de la fracturation pour concevoir la carte de densité de drainage.

Les épaisseurs d'altérites

Ce paramètre et le type de sol régissent l'infiltration de l'eau dans les couches profondes. Sur les sols riches en éléments sableux, le temps de percolation est contrôlé par leur épaisseur (Rodhe & Bockgard 2006, Gleeson 2009). Par

contre, lorsque les sols ont une teneur en argile élevée, ils sont favorables à la rétention de l'eau en surface. La présence d'altérites assure la recharge du milieu fracturé sous-jacent, en agissant comme milieu tampon (Langevin *et al.* 1989). Les épaisseurs des altérites du département de Tanda sont déterminées par la différence entre la profondeur totale de foration et la profondeur du socle des forages. Ce paramètre, lié aux coordonnées des forages de la zone d'étude, a permis de générer, par interpolation selon IDW sous ArcGis 10.5, la carte des épaisseurs des altérites.

Les pentes

Elles sont inversement proportionnelles au potentiel d'infiltration de l'eau pour la recharge des aquifères. Sur les pentes fortes, le ruissellement de l'eau l'emporte sur l'infiltration pour la recharge des aquifères. Les pentes faibles sont favorables à l'accumulation et à l'infiltration de l'eau (Krishnamurthy *et al.* 1996) pour la recharge des aquifères. La pente de la zone d'étude est générée automatiquement sous ArcGis 10.5 à partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Celui-ci est obtenu à partir des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution de 30 m.

Ces critères, qui influencent le processus de recharge dans les nappes fracturées, sont classifiés pour discriminer le niveau d'aptitude à la recharge. Cette classification répond au souci d'être dans de meilleures conditions d'interprétation (Youan Ta 2008). Ces critères sont aussi standardisés pour une bonne analyse multicritère (Jourda 2005). Ils sont également affectés de poids en fonction de leur importance dans l'aptitude à la recharge. Les valeurs de pondération, développées par Koudou *et al.* (2010), ont été déterminées selon la Méthode

Hiérarchie Multicritère de Saaty (1977). Ces valeurs varient entre 0 et 1 et leur somme est égale à 1.

Le Tableau 1 dresse les critères influençant le processus de la recharge qui sont classifiés, standardisés et pondérés.

Le croisement des critères ou cartes thématiques influençant le processus de recharge dans les nappes fracturées est réalisé dans le référentiel cartographique WGS 84 du système UTM zone 30N. Elle s'est faite par agrégation complète par pondération (Joerin 1995, Savané 1997, Saley 2003, Martin *et al.* 2004, Jourda 2005, Koudou *et al.* 2010, Assoma *et al.* 2012, Koudou 2013, Koudou *et al.* 2013). Cette agrégation consiste à la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans l'élaboration des zones de recharge. Elle est déterminée par la formule 1.

$$S = \sum_{i=2}^n WiXi \dots \dots \dots (1)$$

- Avec :
- S : résultat
- Wi : poids du critère i
- Xi : valeur standardisée du critère i.

L'indice d'aptitude à la recharge est reporté dans l'espace et reclassifié en quatre classes (Faible, Moyenne, Forte et Très forte) pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte des zones de recharge des nappes fracturées. Les teneurs en chlorures et les forages secs sont superposés à la carte de modélisation spatiale des zones de recharge des nappes fracturées de Tanda en vue de valider cette dernière et prouver sa fiabilité. La Figure 5 illustre l'organigramme de la méthodologie élaborée pour la cartographie des zones de recharge des nappes de fractures du département de Tanda.

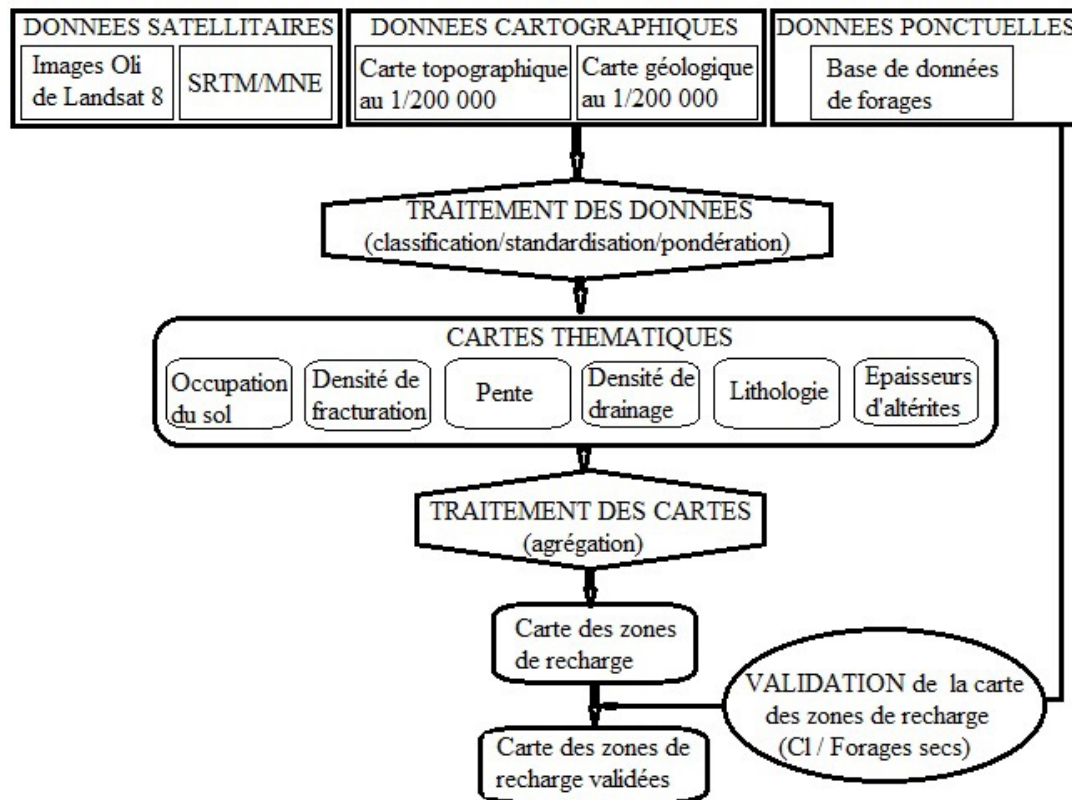


Figure 5. Organigramme de la méthodologie de cartographie des zones potentielles de recharge.

Figure 5. Methodology flowchart for potential recharge areas mapping.

Tableau 1. Classification, standardisation et pondération des critères de la recharge des nappes de fractures du département de Tanda.
 Table 1. Classification, standardization and weighting of criteria of fractured aquifers recharge in the Tanda department.

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes	Poids
Zones de recharge	Pente (%)	Très faible	< 0,5	10	0,402
		Faible	0,5 - 2	7	
		Moyen	2 - 3,5	5	
		Forte	3,5 - 5	3	
		Très forte	> 5	1	
	Occupation du sol	Très faible	Sols nus et zones habitées	1	0,209
		Moyen	Savaane herbeuse	6	
		Forte	Savane arborée	9	
		Très forte	Forêts galerie	10	
	Densité de drainage (km/km ²)	Très faible	< 0,55	10	0,181
		Faible	0,55 - 0,80	7	
		Moyen	0,80 - 0,95	5	
		Forte	0,95 - 1,5	3	
		Très forte	> 1,5	1	
	Densité de fracturation (km/km ²)	Très faible	< 1,5	1	0,103
		Faible	1,5 - 2,1	3	
		Moyen	2,1 - 2,5	5	
		Forte	2,5 - 4	7	
		Très forte	> 4	10	
	Epaisseur d'altération (m)	Très faible	< 10	1	0,062
Faible		10-25	2		
Moyen		25 - 35	5		
Forte		35 - 45	7		
Très forte		> 45	10		
Lithologie	Très faible	cuirasses latéritiques	1	0,043	
	Faible	métagabbro, granodiorites	3		
	Moyen	Metagabbro Metatonalite	5		
	Forte	Schistes Amphibolite	7		
	Très forte	Metaarénite Grès	10		

RESULTATS

Plusieurs cartes thématiques ont été élaborées dans le département Tanda:

Carte d'occupation du sol (Fig. 6)

Quatre (4) classes d'occupation du sol caractérisent le département de Tanda. La forêt galerie localisée au nord et au nord-ouest, se représente sous forme d'îlots dans la savane arborée. Cette dernière couvre le plus grand espace dans le département. Elle s'étend depuis le Nord jusqu'au Centre du département. La savane herbeuse occupe le Sud et s'étend à l'est du département. Les sols nus et habitats s'identifient dans tout le département de Tanda, mais sont plus concentrés au nord.

Carte des fractures (Fig. 7)

La carte de fracturation du département de Tanda présente des fractures de directions et de tailles différentes. Ces fractures s'interconnectent pour former un réseau de fractures plus ou moins dense. Cette densité de fracturation indique l'influence des activités tectoniques subies par les formations

géologiques du département de Tanda. 413 fractures potentielles et/ou contacts entre formations géologiques, et intersections de fractures sont mises en évidence sur la carte. La distribution des fractures en nombre et en longueurs cumulées n'est pas homogène. Les classes majeures en nombre de fractures, dont la fréquence est supérieure ou égale à 10%, sont respectivement N0-10 et N170-180. Pour les fractures en longueurs cumulées, les classes majeures sont N80-90 et N90-100.

Carte de densité de fractures (Fig. 8)

La carte de densité de fractures, dérivée de la carte des fractures du département de Tanda, est caractérisée par quatre classes :

- la classe de très forte densité de fractures, représentée sous forme d'îlots plus ou moins arrondies, se trouve dispersée dans la partie centrale du département. Cette dernière est circonscrite par la classe de forte densité de fractures sur un grand espace dans le centre de la zone d'étude. La classe moyenne entoure celle de forte densité de fractures. Quelques portions s'identifient toutefois au centre du département. Quant à la classe de faible densité de fractures, elle se localise

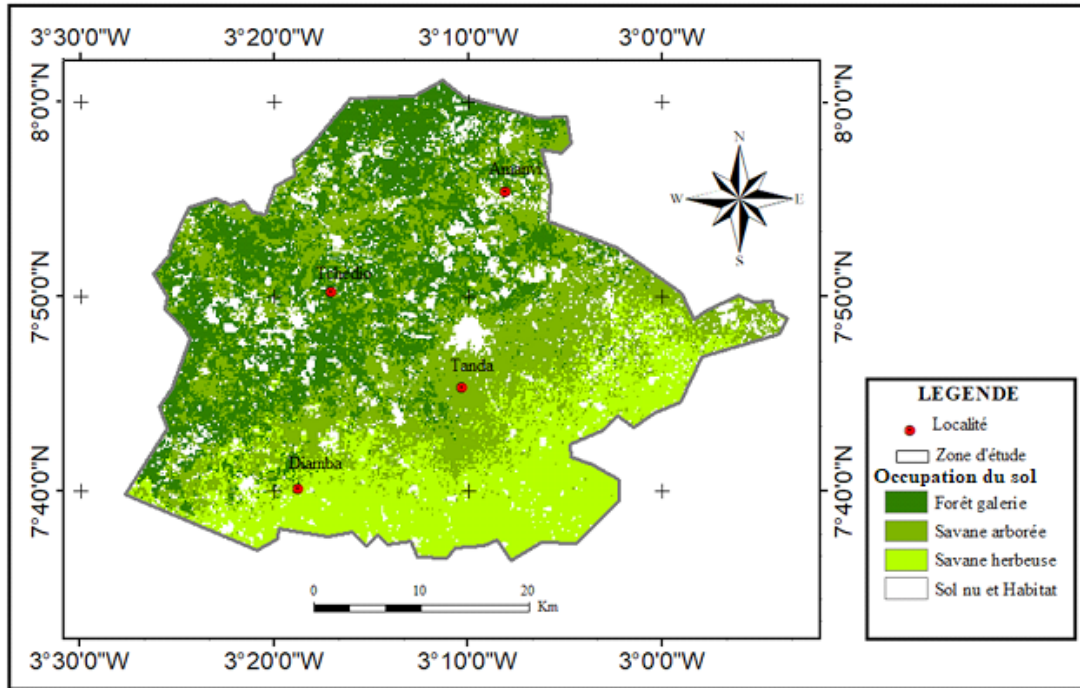


Figure 6. Carte d'occupation du sol du département de Tanda.

Figure 6. Land cover map of the Tanda department.

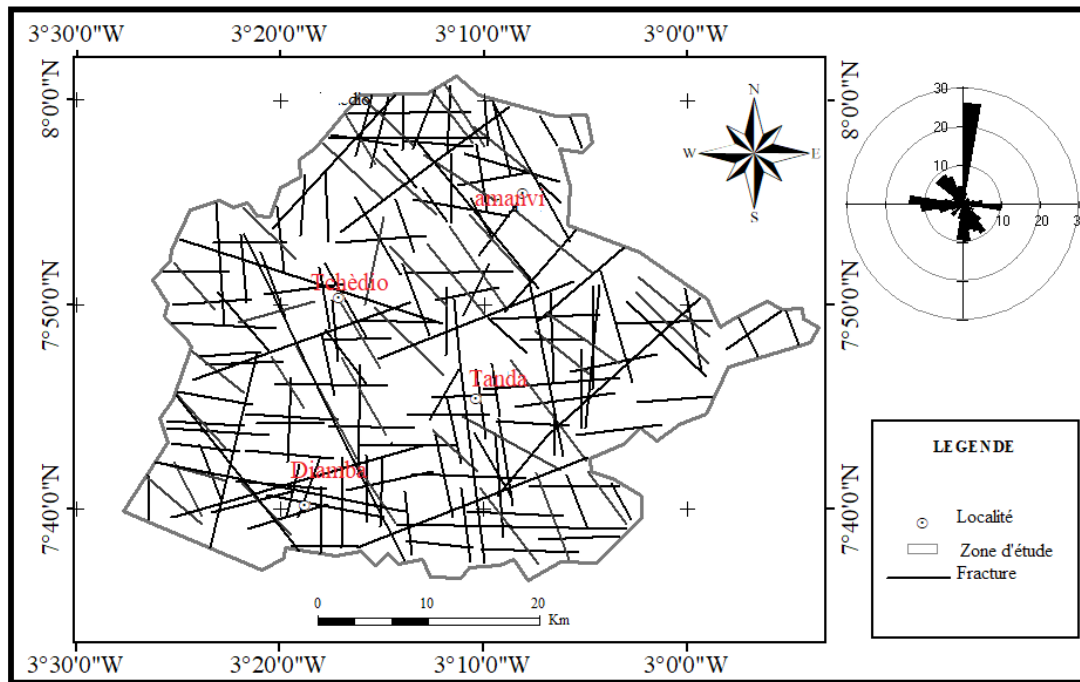


Figure 7. Carte des fractures du département de Tanda.

Figure 7. Fracture map of the Tanda department.

à l'extrémité est du département de Tanda, et se présente sous forme d'îlots au sud et à l'ouest.

Carte de densité de drainage (Fig. 9)

La carte de densité de drainage présente quatre classes. Les zones de très forte densité de drainage se présentent sous forme de portions plus ou moins grande, disséminées dans la zone à forte densité de drainage. Cette dernière s'étend de

l'Est à l'Ouest en passant par le Sud du département. Une fraction s'identifie au Nord. La classe de densité moyenne est la plus représentative du département. Elle s'identifie remarquablement dans la partie centrale, et de part et d'autre de la classe de forte densité de drainage. La faible densité de drainage couvre une surface importante dans le Centre du département. Quelques portions insignifiantes se distinguent dans les limites au Sud de la zone d'étude.

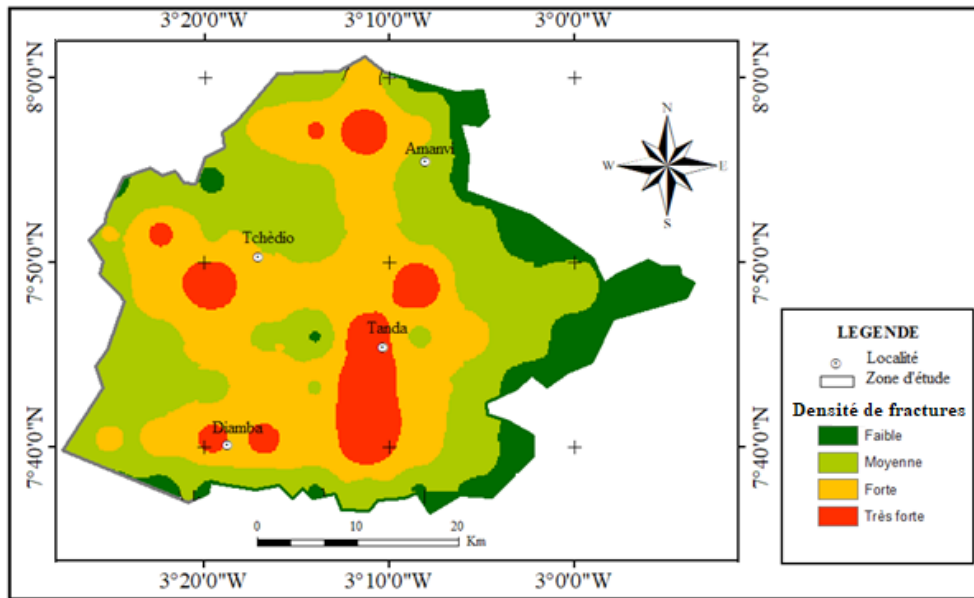


Figure 8. Carte de densité de fractures du département de Tanda.

Figure 8. Fracture density map of the Tanda department.

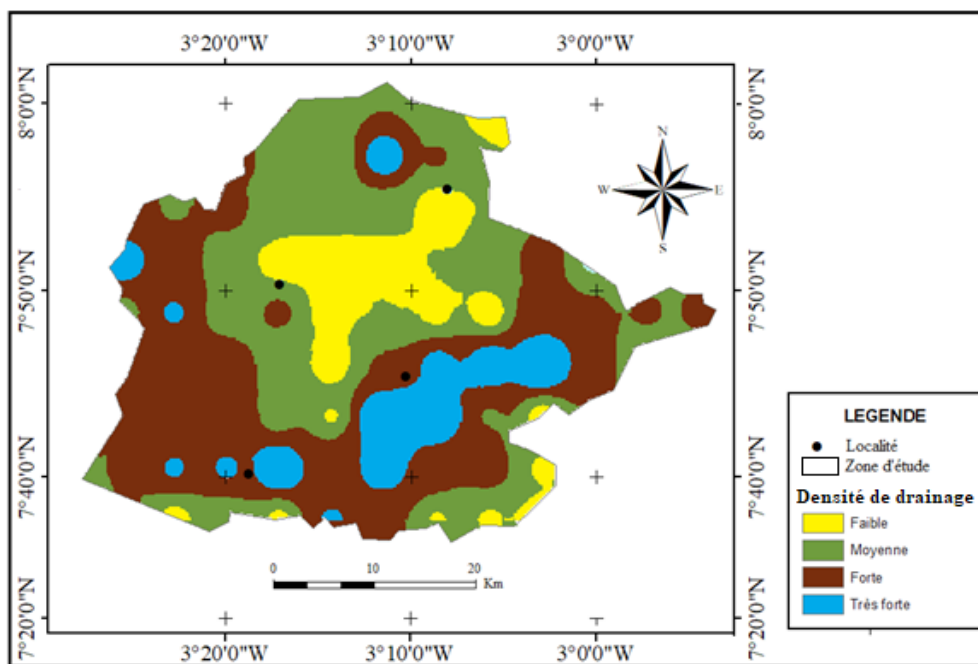


Figure 9. Carte de densité de drainage du département de Tanda.

Figure 9. Drainage density map of the Tanda department.

Carte des épaisseurs d’altérites (Fig. 10)

L’état d’altération des roches dans la zone d’étude est très prononcé. Trois classes d’épaisseurs d’altérites se distinguent dans le département de Tanda. La classe de faibles épaisseurs d’altérites se présente sous forme de petites portions éparpillées dans la classe moyenne. Cette dernière occupe majoritairement l’Est du département. La classe de fortes épaisseurs d’altérites occupe majoritairement l’Ouest du département.

Carte des pentes (Fig. 11)

Les pentes de la zone d’étude sont moyennes à faibles et presque homogènes sur toute l’étendue du département.

Cela est dû au fait que les plaines constituent la majeure partie du relief du département de Tanda. Les pentes peuvent être considérées comme favorables à l’infiltration, donc à la recharge de la nappe de fractures du département de Tanda.

Carte des zones de recharge des nappes fracturées (Fig. 12)

La carte thématique des zones de recharge des nappes fracturées du département de Tanda regroupe quatre classes. Les zones de recharge très forte (17%) et forte (28%) s’étendent du sud-est au sud-ouest du département. Les zones de recharge moyenne (33%) sont identifiées au centre de la zone d’étude. Les zones de recharge faible (22%) occupent le Nord du département.

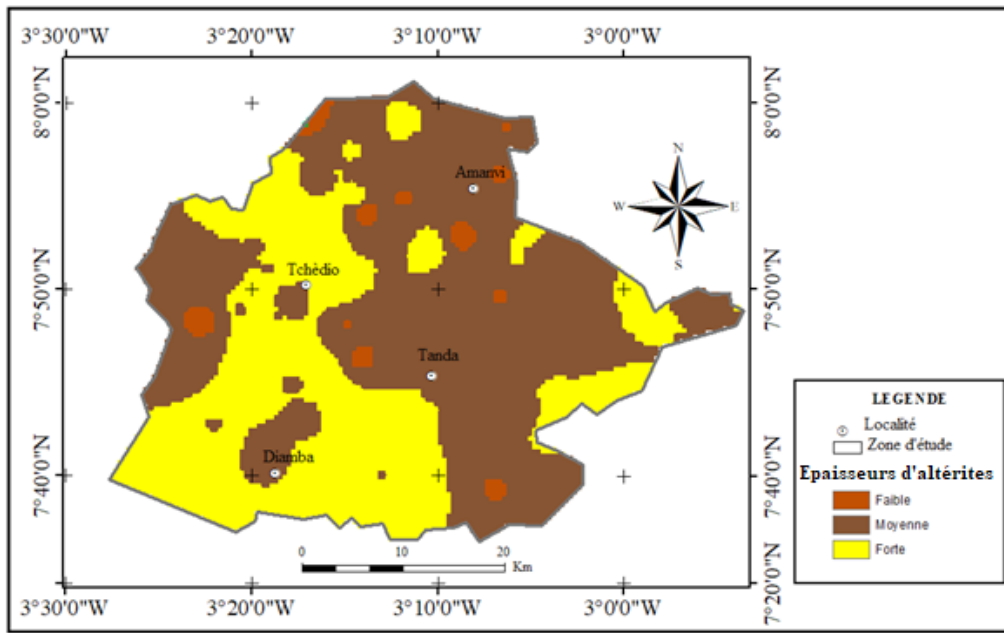


Figure 10. Carte des épaisseurs d'altérites du département de Tanda.

Figure 10. Thicknesses of alterites map of the Tanda department.

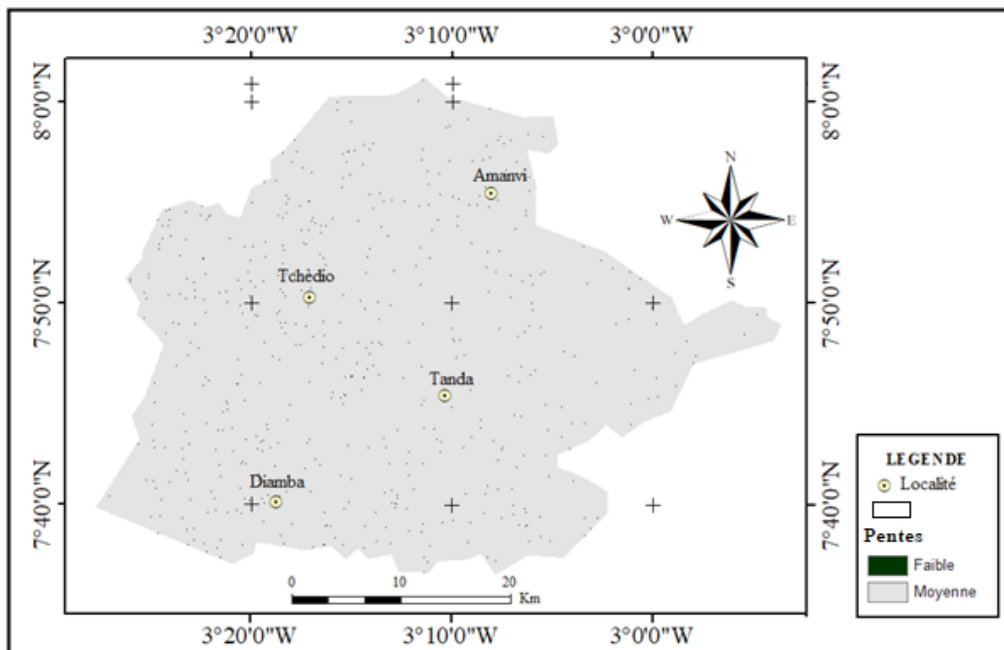


Figure 11. Carte des pentes du département de Tanda.

Figure 11. Slope map of the Tanda department.

Les teneurs en chlorures se superposent indifféremment sur les différentes classes de la carte de recharge. Les valeurs, très faibles, varient entre 3 mg/l et 22 mg/l. Elles sont regroupées en une seule classe. Les forages secs se superposent aux zones de recharge faible.

DISCUSSION

La mise en œuvre cartographique des zones de recharge des nappes fracturées du département de Tanda par analyse multicritère rend compte de la variabilité spatiale des zones de recharge. L'une des difficultés dans la mise en œuvre de la carte des zones de recharge des nappes de fractures est

la définition des limites de classe des critères choisis. Les limites de classe et le nombre de classes varient d'un critère à un autre. Les valeurs des limites choisies ne sont pas nécessairement équidistantes mais significatives du point de vue de la perception des informations voulues. Le choix des limites de classe de la zone d'étude, qui n'est pas figé, se base sur les informations dont on dispose sur le terrain et les objectifs que l'on veut atteindre. Selon Jourda *et al.* (2006), le choix des limites de classe s'opère en fonction de la faculté de discernement de l'opérateur, de son sens de jugement, des valeurs affichées par les histogrammes des critères.

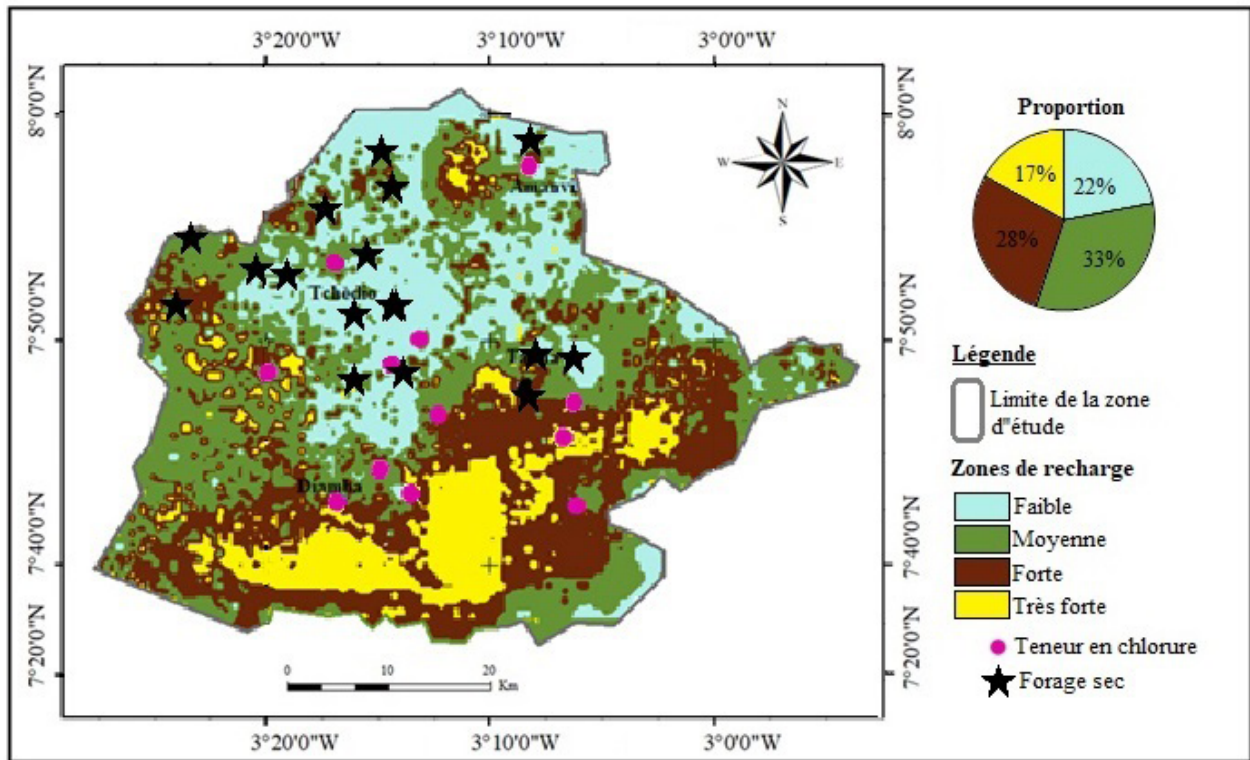


Figure 12. Carte des zones de recharge des nappes de fractures du département de Tanda.

Figure 12. Recharge areas map of fractured aquifers of the Tanda department.

Les résultats statistiques de la classification de l'occupation du sol ont permis d'obtenir un indice Kappa de 0,91 et une précision globale de la matrice de confusion de 94,38%. Ces résultats sont satisfaisants. Ces valeurs traduisent une meilleure discrimination des types d'occupation du sol.

L'extension et la puissance affirmée des altérites du département de Tanda est un fait avéré. Les altérites peuvent alors constituer des réservoirs poreux exploitables ou assurant au moins la recharge du milieu fracturé sous-jacent, en agissant comme milieu tampon (Langevin *et al.* 1989).

L'identification des zones de recharge forte et très forte des nappes de fractures du département de Tanda, ne certifie pas un taux de recharge de la nappe à 100%, même si la prévision semble forte. Le choix du chlorure, pour apporter une certaine réalité et une crédibilité au travail réalisé, est dû au fait que sa concentration dans les eaux souterraines témoigne de celle des précipitations dans les zones agricoles, où l'impact de la pollution anthropique dû à l'utilisation des engrais chlorurés est quasiment nul. La concentration des chlorures peut, de ce fait, être utilisée pour la validation du taux de recharge des aquifères. Les apports anthropiques (industries, fertilisants, etc.), géologiques (évaporites, etc.) ou éoliens (Bromley *et al.* 1997, Herczeg & Edmunds 2000) demeurent en quantités très négligeables dans la zone d'étude. Les faibles teneurs en chlorures dans les forages du département de Tanda se justifient par la recharge diffuse. Le passage du flux d'eau principal à travers la matrice du sol serait court-circuité par des grosses zones d'infiltrations préférentielles. La crédibilité accordée aux mesures de terrain qui sont les teneurs en chlorures pour la validation des zones de recharge, est à prendre avec un peu de réserve. Les teneurs en chlorures des forages du département de Tanda sont faibles et largement inférieures à la norme admise par l'OMS (2017) (250 mg/l) en

ce qui concerne la potabilité des eaux. Même si ces teneurs en chlorures des forages ne couvrent pas de manière homogène la zone d'étude, elles traduisent néanmoins, d'une certaine manière, la recharge dans le département. La superposition des forages secs aux zones de recharge faible traduirait une absence de recharge dans cette partie du Nord du département. La validation de la carte des zones de recharge du département pourrait être améliorée par l'utilisation des activités en carbone 14 (Adiaffi 2008, Adiaffi *et al.* 2009, Assoma *et al.* 2012). Il n'en demeure pas moins que la carte des zones de recharge reste un outil d'aide à la décision susceptible d'aider le décideur dans l'implantation de forages à forte productivité pour l'alimentation en eau des populations. Elle constitue donc un outil stratégique de prospection hydrogéologique (Assoma *et al.* 2012).

CONCLUSION

La mise en évidence des zones de recharges a été effective par l'entremise de l'analyse multicritère et du SIG. La carte des zones de recharge résulte de la combinaison de cartes thématiques bien structurées dans une base de données. La carte de synthèse qui en résulte met en évidence la variabilité spatiale des zones de recharge. Quatre zones de niveau d'aptitude à la recharge différent, validées par des teneurs en chlorures et des forages secs, sont identifiées sur la carte. Les zones de recharge très forte (17%) et forte (28%) se localisent au sud-est et s'étendent jusqu'au sud-ouest du département. Les zones de recharge moyenne (33%) s'identifient au centre. Les zones de recharge faible (22%) occupent le Nord du département. Cet outil hydrogéologique facilite la prise de décision dans l'identification des zones du territoire à forte productivité. Par ailleurs, il sert d'outil stratégique pour l'identification des zones sensibles à l'infiltration, à protéger contre d'éventuels polluants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) de Bondoukou (Côte d'Ivoire) pour la mise à leur disposition de données de forages. Ils expriment toute leur reconnaissance aux rapporteurs du journal pour leurs nombreux commentaires, critiques et suggestions.

REFERENCES

- Abdou Babaye M.S. 2012. *Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako - Niger)*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 244 p.
- Adiaffi B. 2008. *Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-est de la Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, 230 p.
- Adiaffi B., Marlin C., Oga Y.M.S. *et al.* 2009. Palaeoclimatic and deforestation effect on the coastal fresh groundwater resources of SE Ivory Coast from isotopic and chemical evidence. *Journal of Hydrology*, 369, 130–141.
- Aké G.E., Kouamé K.J., Koffi A.B. *et al.* 2018. Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, 2, 129–144.
- Anaba Onana A.B., Ndam Ngoupayou J.R. & Mvondo Ondo J. 2017. Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity: Case of central region in Cameroon. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 66–74.
- Assoma T.V., Adiaffi B. & Koudou A. 2012. Contribution of remote sensing, multi-Criteria analysis and GIS for mapping recharge areas of the coastal Aquifers in southeast Ivory Coast. *American Journal of Scientific Research*, 80, 112–125.
- Bou Kheir R., Shaban A., Girard M.-C. *et al.* 2003. Caractérisation morpho-pédologique des zones karstiques du Liban sensibilité des sols à l'érosion hydrique. *Sécheresse*, 4, 247–255.
- Braune E. & Xu Y. 2010. The Role of Ground Water in Sub-Saharan Africa. *Ground Water*, 2, 229–238.
- Bromley J., Edmunds W.M., Fellman E. *et al.* 1997. Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method. *Journal of Hydrology*, 3–4, 139–154.
- Chantry G. 2003. *Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride par la méthode du bilan des chlorures (MBC): Impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en chlorure dans les précipitations et application à deux grands bassins sédimentaires au Sahel*. Diplôme d'Etudes Supérieures en Gestion Intégrée des Ressources Hydriques Orientation : Gestion des Bassins Hydrographiques, Université de Liège, 44 p.
- Cobbing J. & Hiller B. 2019. Waking a sleeping giant: realizing the potential of groundwater in Sub-Saharan Africa. *World Development*, 122, 597–613.
- Coulibaly A. 2014. *Contribution de la méthode de résistivité électrique (Trainés et Sondages électriques) à la localisation d'aquifères en zone de socle cristallin et cristallophyllien : cas de la région de Tanda, (Nord-est de la Côte d'Ivoire)*. Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Côte d'Ivoire), 147 p.
- Coulibaly A., Lasm T., Kouadio K.E. *et al.* 2014. Contribution of electrical resistivity method to the location of aquifers of Precambrian basement in the department of Tanda (north-eastern Côte d'Ivoire). *Journal of Scientific Research and Reports*, 5, 723–741.
- Edet A., Okereke S., Teme C. *et al.* 1998. Application of remote sensing data to groundwater exploration: a case study of the Cross River State, south eastern Nigeria. *Hydrogeological Journal*, 6(3), 394–404.
- Etrillard A.-P. 1994. *Etude de la recharge des nappes aquifères de Bidi au Burkina Faso*. Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Civil et Minier. Institut National Polytechnique de Lorraine (France), 93 p.
- Gaye C.B. & Edmunds W.M. 1996. Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environmental Geology*, 27, 246–251.
- Géomines 1982. *Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise*. République de Côte d'Ivoire, Ministère des Travaux Publics et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, carte de Agnibilékrou-Kouamé Dari, Cahier n°14.
- Girard M.-C. & Girard C. M. 1999. *Traitement des données de télédétection. Interprétation physique des données, les comportements spectraux*. Dunod, Paris, 529 p.
- Gleeson T. 2009. *Groundwater recharge, flow and discharge in large crystalline watershed*. PhD Thesis, Civil Engineering Department, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 147 p.
- Haouchine A., Abderrahmane B., Haouchine Z.F. *et al.* 2010. Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride : Cas de la plaine d'El Outaya, Biskra, Algérie. *Eurojournals*, 4, 1–3.
- Herczeg A.L. & Edmunds W.M. 2000. *Inorganic ions as tracers*. In Cook P. & Herczeg A.L. (eds). *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Kluwer Academic Publishers Group, 529 p.
- Huet M. 2015. *Comparaison de méthodes d'estimation de la recharge des aquifères : exemples de la région Charlevoix-Haute-Côte-Nord*. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la Maîtrise en Sciences de la Terre, 92 p.
- Ibrahim M. 2013. *Impacts des changements d'usage des sols sur les ressources en eau souterraine au Sahel nigérien*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 173 p.
- Joerin F. 1995. Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue Internationale de Géomatique*, 1, 37–51.
- Jourda J.P., Kouame K.J., Saley M.B. *et al.* 2015. Détermination des zones potentiellement favorables à l'implantation de forages manuels à partir d'analyse multicritère et d'un SIG : cas de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau*, 28(2), 119–137.
- Jourda J.P., Saley M.B., Djagoua E.V. *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. *Télédétection*, 4, 339–357.
- Jourda J.P.R. 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 d'état, Université de Cocody-Abidjan, 430 p.
- Kouakou K.E.G., Sombo B.C., Digbéhi Z.B. *et al.* 2012. Utilisation de la prospection géophysique par résistivité électrique pour la recherche d'eau souterraine dans le département de Tanda (Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 83(2) 230–244.
- Kouamé K.A. 2005. *Contribution à l'étude hydrologique et hydrogéologique de la zone de confluence des deux Bandama (Bandama blanc et Marahoué) dans la région de Kossou-*

- Bouaflé. Mémoire de DEA, Sciences de la Terre, Université de Cocody, 78 p.
- Koudjega K.H., Kodja D.J. & Vissin W.E. 2013. Cartographie des zones potentielles de recharge des eaux souterraines du paléocène supérieur par la méthode multicritère dans le bassin du Mono-Couffo au Bénin. *International Engineering Journal For Research & Development*, 4, 1–15.
- Koudou A. 2013. *Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin versant du N'zi*. Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 211 p.
- Koudou A., Adiaffi B., Assoma T.V. *et al.* 2013. Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, 2, 211–226.
- Koudou A., Kouamé K.F., Youan Ta M. *et al.* 2010. Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'Analyse Multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). *Photo-Interpretation European Journal of Applied Remote Sensing*, n°2010/3–4, 98–115.
- Koudou A., N'dri B.E., Niamké K.H. *et al.* 2016. Analyse de la productivité et estimation de la vulnérabilité à la pollution pour l'optimisation de l'implantation des forages dans les aquifères de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, n° 38, 149–164.
- Krishnamurthy J., Venkatesa Kumar N., Jayaraman V. *et al.* 1996. An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, n°10, 1867–1884.
- Labrecque G. 2019. *Évaluation de la recharge des eaux souterraines à différentes échelles par une approche couplant des modèles hydrologique et hydrogéologique : le cas du bassin versant non-jaugé de la rivière Caribou*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 63 p.
- Lachassagne P., Wyns R., Bérard P. *et al.* 2001. Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Ground Water*, n°4, 568–581.
- Langevin C., Pernel F. & Pointet T. 1989. *Recherche de secteurs à potentiel aquifère en zone de socle, massif granitique de Huelgoat (Finistère) : analyse multicritère, cartographie assistée (SYNERGIE), perméabilité de fracture (méthode RADON)*. BRGM, Service sol et sous-sol, Département Eau, 120 p.
- Lasm T. 2000. *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)*. Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
- Maréchal J.C., Dewandel B. & Subrahmanyam K. 2004. Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 11, 1–17.
- Margat J. 1990. *Les eaux souterraines dans le monde*. BRGM, services sol et sous-sol, Département Eau, 42 p.
- Martin J.L., Henry E., Boulemia C. *et al.* 2004. Proposition d'outils de gestion et d'aide à la décision dans une moyenne collectivité locale : application à l'exploitation de la ressource en eau souterraine. *Actes de la journée d'études « Les territoires de l'eau »*, Université d'Artois, Arras, 74–82.
- Mohamed A.S. 2012. *Approches hydrodynamique et géochimique de la recharge de la nappe du Trarza, Sud-Ouest de la Mauritanie*. Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre. Université Paris Sud - Paris XI, 181 p.
- N'da D.H. 2007. *Etude et suivi par télédétection et système d'informations géographiques d'une aire protégée soumise aux pressions anthropiques : cas du parc national de la Marahoué*. Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, 181 p.
- Nouayti N., Khattach D. & Hilali M. 2017. Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : apport de la télédétection et du système d'information géographique. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, n° 39, 45–57.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (2017). *Directives de qualité pour l'eau de boisson* : 4e éd. intégrant le premier additif, Genève, 539 p.
- Oularé S., Adon G.C., Akpa Y.L. *et al.* 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 Télédétection. *European Scientific Journal*, n°36, 192–217.
- RGPH (Recensement Général de la Population et de l'Habitat) 2014. *Répertoire des localités : Région du GONTOUGO*, 50 p.
- Rivard C., Lefebvre R. & Paradis D. 2014. Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental Earth Sciences*, 71, 3, 1389–1408.
- Rodhe A. & Bockgard N. 2006. Groundwater recharge in a hard rock aquifer: a conceptual model including surface-loading effects. *Journal of Hydrology*, 330, 389–401.
- Saaty T.L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234–281.
- Saley M.B. 2003. *Système d'Informations Hydrogéologiques à Référence Spatiale, discontinuités pseudo-image et cartographies Thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse de doctorat unique, Université de Cocody, 211 p.
- Savané I. 1997. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information d'hydrogéologique à référence spatiale*. Thèse de Doctorat es Sciences, Université d'Abidjan. 67 Tab. 30 phot, 139 fig, 395 p.
- Scanlon B., Healy R. & Cook P. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 18–39.
- Seguin J.-J., Lanini S., Caballero Y. *et al.* 2015. *Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes : complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines*. Rapport final, BRGM/RP-65635-FR, 219 p.
- Sener E., Davraz A. & Ozcelik M. 2005. An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 13, 826–834.
- Siméon Y., Delor C., Zeade Z. *et al.* 1995. *Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Agnibilékro*. Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire, n°8 Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Siva Prasad Y. & Venkateswara Rao B. 2018. Groundwater recharge estimation studies in a khondalitic terrain of India. *Applied Water Sciences*, 8, 102, 1–9.

- Sophocleous M. 2004. *Groundwater recharge and the water budgets of the Kansas High Plains and related aquifers*. Kansas Geological Survey Bulletin 249, 102 p.
- Soulé de Lafont D. 1955. *Préambrien moyen et supérieur de Bondoukou (Côte d'Ivoire)*. Bulletin BFMG, Dakar, N°18, 163 p.
- Tempier P. 1969. Données récentes sur la géologie de socle de la Côte d'Ivoire. *Annales Université d'Abidjan (Côte d'Ivoire)*, 5, 55–92.
- Wyns R., Lacquement F., Corbier P. *et al.* 2002. *Cartographie de la réserve en eau souterraine du massif granitique de la Roche sur Yon*. Rapport BRGM/RP– 51633 / FR. BRGM, Orléans, pp 26.
- 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 unique de doctorat, Université de Cocody, 238 p.
- Zeade Z., Délor C., Siméon Y. *et al.* 1995. *Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Bondoukou*. Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire, N°10 Abidjan, Côte d'Ivoire.

Manuscrit reçu 13/04/2021
Version révisée acceptée le 02/03/2022
Version finale reçue le 10/03/2022
Mise en ligne le 14/03/2022