

Approche synergique entre technique spatiale et données de terrain pour l'identification des aquifères fissurés de socle en milieu semi-aride (Liptako, Sud-Ouest du Niger)

Synergistic approach between spatial technique and field data for the identification of fractured basement aquifers in semi-arid environment (Liptako, South-west Niger)

Maman Sani ABDYOU BABAYE¹, Illias ALHASSANE^{2*}, Issa Malam SALMANOU³,
Issoufou Boukari OUSMANE⁴, Moussa KONATE⁴

1. Département de Géologie, UMR SERMUG, Faculté des Sciences et Techniques, Université Dan Dicko Dankoulodo, B.P. 465, Maradi, Niger.
2. Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Agadez, B.P. 199, Agadez, Niger *illiasalhassane@gmail.com).
3. Département de Géologie et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Zinder, B.P. 656, Zinder, Niger.
4. Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni de Niamey, B.P. 10662, Niamey, Niger.

Résumé. Dans la zone de socle du Liptako nigérien, l'exploitation des images satellitaires et des données de terrain a permis de cartographier les fractures. Sur ces images, l'application de plusieurs techniques, notamment l'analyse en composantes principales et le filtrage spatial et directionnel, ont abouti à l'identification et à la classification des structures linéaires. Les résultats issus de ces traitements sont validés par les travaux antérieurs à grande échelle, la carte d'occupation des sols, les mesures de terrain (direction, ouverture) et les mesures géophysiques. Ainsi, l'analyse de la distribution spatiale montre que les réseaux des fractures se répartissent entre les orientations N00° à N20°, N40° à N60°, N70° à N80°, N100° à N110°, N130° à N140° et N160° à N175°. Parmi ces classes, deux directions principales N140°-160° et N40°-60° se démarquent des autres, rappelant ainsi les accidents libériens (NW-SE) et les directions NE-SW des grands couloirs de cisaillement. L'apport remarquable de cette étude est la détermination des différentes directions productives NE-SW et E-W et dans une moindre mesure les directions NW-SE et N-S. La carte multicouche indiquant les directions préférentielles d'écoulement produite, servira de guide pour les futures recherches d'eau souterraine dans le socle du Liptako. L'étude géophysique a permis de préciser le passage des structures linéaires (faille, filon, zone de contact) détectées par les images satellites.

Mots-clés : Aquifères fissurés, Socle, Télédétection, Géophysique, Liptako, Niger.

Abstract. In the Nigerian Liptako basement area, satellite images and field data are used to map fractures. On these images, the application of several techniques, including principal component analysis, and spatial and directional filtering, led to the identification and classification of linear structures. The results of these processing techniques are widely validated by previous large-scale work, the land use map, field measurements (direction, aperture) and geophysical field measurements. Thus, the spatial distribution analysis shows that the fracture networks are distributed among orientations N00° to N20°, N40° to N60°, N70° to N80°, N100° to N110°, N130° to N140° and N160° to N175°. Among these classes, two main directions N140°-160° and N40°-60° stand out from the others, reminiscent of the Liberian (NW-SE) accidents and the NE-SW directions of the major shear corridors. A remarkable contribution of this study is the determination of the different productive directions NE-SW and E-W and to a lesser extent the NW-SE and N-S directions. The multilayer map showing the preferential flow directions produced will serve as a guide for future groundwater investigations in the Liptako basement. The geophysical study made it possible to specify the nature of the linear structures (faults, veins, contact zones) detected by the satellite images.

Keywords: Fractured aquifers, Basement, Remote sensing, Geophysics, Liptako, Niger.

Abridged English Version

Geological setting

The bedrock of the study area is formed by Precambrian basement formations with alternating granitoid intrusive massifs and metamorphic belts (Abdou *et al.* 1998, Soumaila & Konaté 2005) (Fig. 1). The latter are oriented NNE-SSW and consist of greenstone (pyroxenites, amphibolites, epidotites, chloritoschists, metabasalts, metagabbros), sandstone (grauwackes), rhyolitic tuffs and breccias and various shales. The granitoid intrusions composed of eburnean rocks (granites, granodiorites and diorites), contain in places Archean relics (pegmatites, leptynites) (Abdou *et al.*, 1998).

Materials and methodology

The data used in this study includes the geological map of Tillabéry at a scale of 1/200000 (Abdou *et al.* 1998), the

ASTER image (scene) acquired on March 15, 2007 (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>) and the Landsat image (ETM+) (scene) of October 2010 made available to us by the Regional Centre AGRHYMET (RCA). The processing and interpretation of these images were done using ENVI 4.3 software.

The field data which are on the one hand, the fracturing measurements made directly on the outcrops have focused on the direction, opening and filling when possible and field-apparent resistivities of the land on the other hand.

For the processing of the fracture field (number and orientation of fractures) derived from the ASTER image and the fractures measured on the outcrops, we used respectively Linwin and Excel software. As for the processing of geophysical data, the 1XD software was used for their processing.

Image pre-processing

The various pre-processing operations applied to a satellite image are radiometric and geometric in nature. They allow the restoration and correction of distortions and radiometric and geometric degradations that affect the image during its recording. Due to the semi-arid climate of the region, and especially since the shooting was done in the dry season, this image has not been subject to radiometric correction. On the other hand, the geometric correction is made from the 8 bitter points identified on a corrected image of the region.

Application of Sobel's directional filters

For lineament extraction, Kouamé *et al.* (2006) demonstrated the good suitability of the ASTER image band 6. To enhance the contrasts between the structures in the image, we applied the Sobel directional filter with a 7 x 7 matrix in the N-S, NE-SW, E-W and NW-SE orientations (Tab. 1).

For each direction used, the filter emphasizes the direction perpendicular to it. Figure 2 shows an example of a raw image (a) and a filtered image (b) from the Sobel N-S filter highlighting the E-W lineaments.

Manual lineament extraction by visual analysis

Lineament extraction can be done automatically by using a mathematical algorithm (Hung *et al.* 2005, Ghazi 2013). But for this study, we however use the visual interpretation approach used successfully by several authors (Edet *et al.* 1998, Koussoubé *et al.* 2003, Kouamé *et al.* 2006, Youan Ta 2008, Abdou Babaye 2012, Illias *et al.* 2018).

Manual extraction of image discontinuities was performed with band 6 of Aster image from directional filtering. This tracing of segments (lineaments) is done directly on the screen by proceeding at the same time to localized magnifications for the structures that are difficult to observe.

Control and validation

The control and validation phase of the linear structures extracted from the image processing is necessary to specify their structural significance (Razack 1984, Koussoubé 1996). Before proceeding with the validation test, the linear structures of anthropic origin were removed (roads, tracks, etc.).

Thus, the validation tests of these lineaments consisted of relating the main directions obtained from image processing to those of micro-tectonic measurements made on outcrops and fractures from the geological map. The latter contains less information than the lineament map. This is due to the very small scale (1/200,000) of the geological map compared to the study area.

Also, the lineament map was compared with the land use map. Field validation of the fracturing-rock alteration couple was also done by geophysical techniques and micro-tectonic measurements on some outcrops.

The resistivity data from the electrical profiling and soundings were used to identify ground fractures on the ground, but also to characterize the nature and strength of their filling materials.

Results and discussion

Figure 3 presents the results of the manual extraction of lineaments from the visual interpretation of the filtered images. It highlights the spatial distribution of lineaments of varying sizes. The directional rosette (Fig. 4) shows that the majority directions are N-S (15%), N40°-60° (22%),

N80°-100° (16%) and N140°-160° (17%). Among these classes, two main directions N140°-160° and N40°-60° stand out, reminiscent of the Liberian Regional Accidents (NW-SE) and the NE-SW directions of the great shear corridors (Abdou *et al.* 1998, Soumaila, 2000, Soumaila & Konaté 2005) structured during the Eburnian orogeny (Engalenc 1978). Numerous veins (quartz, pegmatite, and dolerite) and biotite tension cracks are developed along the N-S, N70°-80° and N140°-160° directions. Once altered, these veins constitute preferential zones for infiltration and circulation of groundwater (Dassargues & Monjoie 1991).

Correlation of lineaments-regional tectonic faults-plant alignments

Overlaying the lineament map over geological data shows that there is a correlation between these two types of data (Fig. 5). The major lineaments correspond to the regional-scale faults. In addition to this similarity, the lineament map is denser than the fault map.

The spatial distribution of the lineaments shows a net difference between the north and the south of the study area, due to the influence of the geological context of the terrains crossed and the influence of the tectonic episodes that affected these two terrains (Dupuis *et al.* 1991). According to Machens (1973), the relics of the Liberian rocks, as well as the accidents related to this phase, are preserved on the granitoid massifs.

Geophysical investigations

The geophysical technique of electrical resistivity was used to validate and locate the lineaments on the ground. Six sites were investigated for electrical tracers (Tab. 2), three of which were electrically drilled (Fig. 7- 8).

At the Doumba and Tilim sites, four resistivity profiles (P1, P2, P4 and P5) were installed to identify the passage of two linear structures oriented N45° and identified on the satellite image. These profiles, made along the N130° direction, show irregular shapes characterizing zones of high and low resistivity in relation to the resistivity of the terrain crossed. The low resistivity zones are generally associated with high permeability faults, likely to constitute a potential aquifer (Ball *et al.* 2010, Ruelleu *et al.* 2010). The hydrogeological interest of this method is to isolate the conductive and resistive structures along a given line, but it does not provide information on the number of terrains present and the decompressed horizon at the basement roof. The peak observed on profile P1 ($\rho_a = 1000 \text{ .m}$) explains the presence of a resistant vein associated with a conductive zone (Ogier 1976). Electrical soundings (SE1) carried out (Fig. 8) at the conductive anomalies of profiles P1 and P2 ($\rho_{a1} = 10 \text{ .m}$ and $\rho_{a2} = 30 \text{ .m}$) yielded "boat-bottom" diagrams corresponding to the superposition of the three terrains (Koussoubé *et al.* 2003, 2006, Jourda 2005).

Directional distribution of fractures

Figure 7 shows the distribution of the main fracture directions, expressed as a percentage of the number and cumulative lengths. The directional fracture rosette shows a relatively homogeneous distribution of the main directions observed.

The fracture number rosette (Fig. 4a), shows that among the different fracture directions measured, three directions seem to predominate. These are the average directions N45°, N65° and N150° which present a percentage higher than 10%. Similarly, the rosette representing the cumulative lengths of fractures shows the same trend, but with a preponderance of

the N-S direction and a rate of less than 10% for the N150° direction fracturing (Fig. 4.b).

Several authors have confirmed the existence of a strong linear correlation between fracturing intensity in number and cumulative fracture lengths (Razack 1984, Jalludin 1993, Lasm 2000, Youan Ta *et al.* 2008, Jourda 2005).

In Liptako, the major structural directions observed consist of four families with orientations N20° to N50°, N60° to N90°, N140 to N150°, and N350° to N10° (Fig. 4c).

Accidents N20° to N50° are more abundant on green rocks. Nevertheless, they are also observed in the contact zones of the Tera region. The zones affected by this deformation are of the same direction as the pluton (Pons and al. 1995) and are manifested by the formation of foliated structures (migmatites and gneisses). At the level of the belt formations, C-S structures appear with a sigmoidal schistosity between the shear planes (Soumaila & Konaté 2005).

These N20° to N50° faults determine the major structural direction marked by the S1 regional schistosity, foliations and large dexterous shear corridors (Abdou *et al.* 1998, Soumaila 2000).

Relationship between fracturing and productivity of the works

In the Dargol basin, the flow rates of the boreholes vary from 0.5 to 15 m³/h. The class of medium and high flow rates is 33%, which is acceptable for village hydraulics. The very low and low flow rates are 35% and 32% respectively. The importance of these last classes (67%) shows that the

problem of supplying drinking water to the population and their livestock is still very acute in this area. Consequently, new investigations are needed to locate sites likely to provide high-flow boreholes. To this end, a multi-layer map (Fig. 10) was drawn up, from which the following information can be drawn:

- The high-flow boreholes are those located on or near fracture nodes, and their flow volumes appear to be proportional to fracture sizes. However, the productivity of fractures is a function of their hydraulic characteristics (Lasm 2000, Saley 2003, Kouadio *et al.* 2008).

- In the Dargol basin, the most productive directions are mainly NE-SW (N40 to N60), E-W (N70 to N100). In contrast, the NW-SE and N-S directions offer only modest flow rates, generally less than 2.5 m³/h. These main fracturing directions have been highlighted by the study of satellite images and field observations.

- Green rocks (shales) are more productive than granitoids, this could be explained by the presence of important veins (quartz, quartzites, microdiorites) or sandstone banks in the shales (Engalenc 1978), and by the capacitive role of these rocks due to the great power of the alteration layer.

- The NE-SW direction of Birrimian elongation, the most productive, corresponds to the great shear corridor (N45) of the Nigerian Liptako (Soumaila & Konaté 2005). The relatively low productivity of the NE-SW direction could be related to the clogging of these fractures by dolerite injections (Abdou *et al.* 1998), as the alteration of these rocks yields argillaceous products (Engalenc 1978).

INTRODUCTION

Dans les zones de socle, les roches cristallines et cristallophylliennes sont des roches à perméabilité matricielle très faible. Elles ne peuvent devenir aquifères que si elles sont altérées ou fissurées (Engalenc 1981). L'étude de ces types d'aquifères nécessite l'identification des zones capables d'emmagasiner et de favoriser la circulation d'eau dans ces milieux. Les zones fracturées ou fissurées sont importantes pour identifier et caractériser ces aquifères car elles constituent les zones préférentielles d'écoulement des eaux souterraines (Deslandes & Qwyn 1991, Edet *et al.* 1998, Yeh *et al.* 2008). L'identification et la caractérisation de ces zones permettent d'améliorer la productivité d'ouvrages dans ces zones où le taux de couverture en eau est très faible (Kouamé 1999, Saley 2003, Jourda 2005, Lasm 2000, Boutt *et al.* 2010, Holland & Witthüser 2011).

Dans la région du Liptako en général, et la zone d'étude en particulier, les taux de desserte en eau sont respectivement de 60,68% et de 49,31% (Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement). Ces taux sont faibles par rapport à la moyenne nationale qui s'élève à 64,25%. Ce faible taux zonal de couverture en eau montre que malgré le progrès enregistré pour satisfaire les besoins en eau de la population, beaucoup reste à faire pour arriver à bout de ces besoins vitaux. La recherche des nouveaux sites de forages avec une forte probabilité de succès, impose d'améliorer les connaissances de l'hydrogéologie de ce milieu fissuré complexe. Il devient donc nécessaire et urgent de développer des outils efficaces permettant de localiser les sites favorables à l'implantation des forages avec une forte probabilité de succès.

L'utilisation combinée des techniques de la télédétection et de la géophysique est un moyen efficace d'exploration

hydrogéologique. Elle permet de localiser des accidents susceptibles d'induire des conductivités hydrauliques plus importantes, et donc de jouer un rôle sur les flux d'eaux souterraines (Berkowitz 1995, Odling 1997, Rodney *et al.* 2011). Ces techniques d'exploration, utilisées depuis le début des années 80 en Afrique de l'Ouest (Engalenc 1978-1981, Guiraud *et al.* 1990, Corgne *et al.* 2010), ont permis de réduire le taux d'échec des forages (Savado 1984, Faillat 1986, Biemi 1992, Koussoubé 1996, Savané 1997, Edet *et al.* 1998, Kouamé 1999, Jourda 2005, Abdou Babaye 2012, Illias 2018).

En Côte d'Ivoire (Biemi 1992, Savané 1997, Jourda 2003) et au Burkina-Faso (Savado 1984, Nakolendousse 1991, Koussoubé 1996), la combinaison des techniques de prospections appropriées (télédétection, géophysique, géologie structurale) a permis de localiser les fractures sous les couches d'altération, contribuant ainsi à améliorer le taux de succès des forages. L'utilisation conjointe de ces techniques dans la recherche d'eau à grande échelle n'est pas très développée au Niger. Néanmoins, dans le cadre du programme d'hydraulique villageoise, certaines études locales, menées par les bureaux d'études internationaux et locaux, ont utilisé avec succès l'approche par photo-interprétation (Bureau de Recherche Géologique et Minière, BRGM 1980-1989) ou combinée, photo-interprétation-géophysique (International Water Supply Consultant, IWACO 1983) pour l'implantation des forages.

Cette étude s'inscrit dans cette optique, elle a pour objectif principal d'identifier et de caractériser les réservoirs fissurés de socle, en vue d'améliorer le taux de desserte en eau dans ce milieu semi-aride de socle.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Contexte géologique de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la partie sud-ouest du Niger et occupe la partie centrale du bassin du Dargol qui est un affluent rive droite du fleuve du Niger (Fig. 1). Avec une superficie de 900 Km², cette zone se trouve entre les longitudes 0°30' et 0°50' Est et les latitudes 13°45' et 14°20' Nord. Le climat est du type sahélien avec une alternance d'une longue saison sèche (octobre à mai) et une courte saison hivernale allant de juin à septembre. Selon les données météorologiques de la période 1999–2008, les valeurs mensuelles extrêmes de la température varient entre 15°C (janvier) et 43°C (avril-mai), pour une moyenne annuelle de 29°C. Les variations les plus importantes de températures sont observées pendant les deux périodes, «froide» et «chaude», composant la saison sèche. Le taux d'humidité relative de l'air montre une variation annuelle de 18% (mars) à 90% (août). La pluviométrie moyenne annuelle à la station pluviométrique de Téra est de 409 mm (1999–2008), tandis que l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée à partir de la méthode de Penman à la même période atteint 2000 mm soit cinq fois la hauteur pluviométrique annuelle. 25% des précipitations sont issues d'événements de forte intensité (Panthou *et al.* 2014) qui produisent des écoulements rapides de type hortonien (Amani & Nguetora, 2002). La forme, l'orientation et la densité du réseau de drainage sont influencées par la topographie, les matériaux de couverture, la nature et la structure tectonique du socle.

Prenant sa source au Burkina Faso, sur environ 600 m d'altitude, la rivière temporaire de Dargol et son principal affluent le Tilim drainent la zone d'étude dans le fleuve du Niger (altitude 148 m à la station de Kakassi), à environ 90 Km au nord-ouest de Niamey (Fig. 1). Son écoulement, lié à la pluviométrie, commence en juin-juillet pour s'achever trois mois plus tard, pour un débit moyen de 160.10⁶ m³/an (1964 - 1994). L'hydrologie de la zone est aussi marquée par la présence d'un chapelet de mares semi-permanentes et des retenues artificielles d'eau parmi lesquelles, seul le barrage de Téra (volume d'eau utile de 7,7.10⁶ m³ à sa création en 1981) contient de l'eau toute l'année.

La zone est marquée par un relief relativement plat avec des collines isolées et des cordons dunaires hérités des périodes arides durant le Quaternaire dont les points culminants sont à environ 350 m. Ces ensembles morphologiques sont entaillés par des vallées le plus souvent sèches (koris) qui drainent les eaux vers des dépressions (vallées, mares) pendant la saison hivernale. Une végétation dégradée et clairsemée (savane et steppe) occupe les plateaux, alors que le fond des vallées et des dépressions font place à une végétation ligneuse plus dense. Le taux de croissance démographique local est d'environ 3,9% par an sur la période de 2001 à 2012, avec plus de 95% de la population vivant de l'agriculture pluviale ou d'élevage extensif (Institut National de la Statistique, INS 2012).

Le substratum de la zone d'étude est formé par des formations précambriennes de socle avec une alternance des massifs intrusifs granitoïdiques et des ceintures métamorphiques (Abdou *et al.* 1998, Soumaila & Konaté

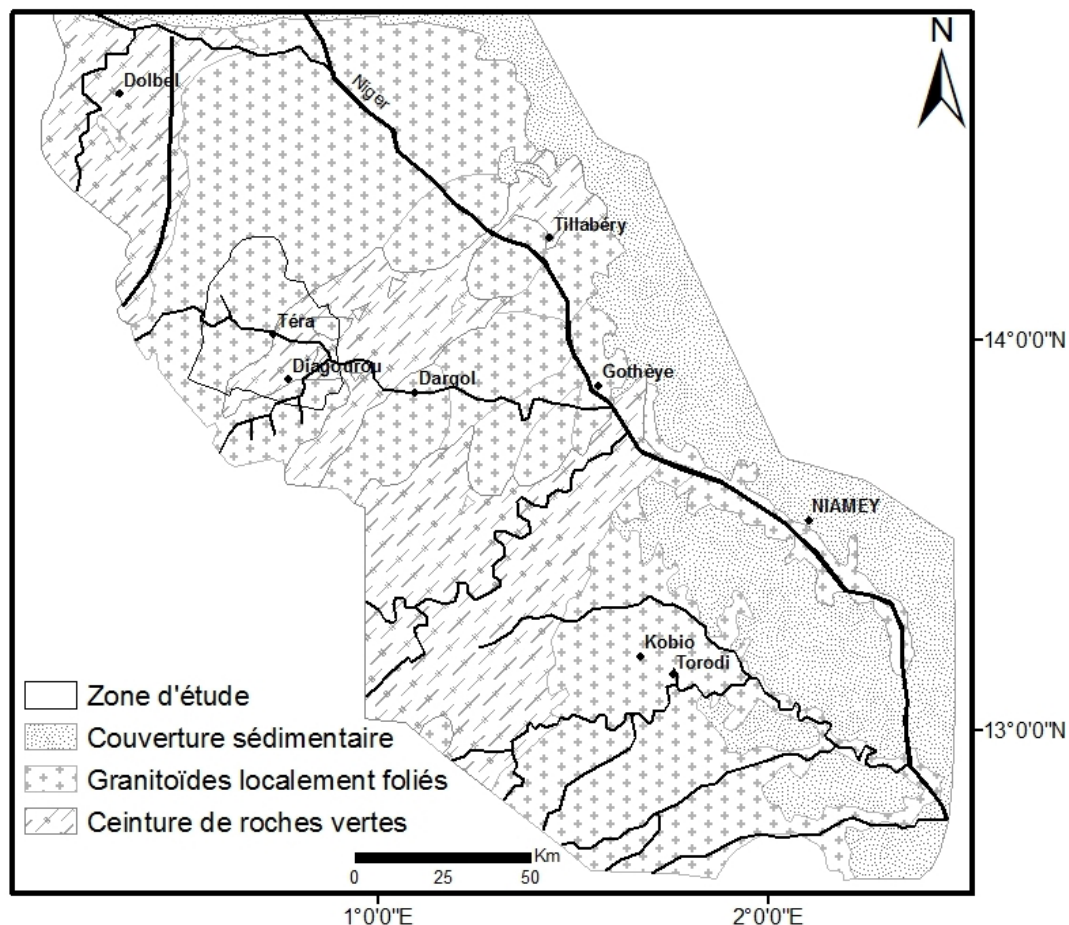


Figure 1. Localisation et contexte géologique de la zone d'étude.

Figure 1. Location and geological context of the study area.

2005) (Fig. 1). Ces dernières d'orientation NNE-SSO, sont constituées de roches vertes (pyroxénites, amphibolites, épidotites, chloritoschistes, metabasaltes, métagabbros), des roches grésopélitiques (grauwackes), des tufs et brèches rhyolitiques et des schistes variés. Les intrusions granitoïdiques composées des roches ébunéennes (granites, granodiorites et diorites), renferment par endroit des reliques archéennes (pegmatites, leptynites) (Abdou *et al.* 1998). Les formations de socle sont surmontées d'une couverture superficielle formée d'altérite (5 à 50 m d'épaisseur), des alluvions et des colluvions. A l'échelle régionale, quatre familles principales de fractures constituent les grandes directions structurales (Abdou *et al.* 1998, Abdou Babaye 2012) : N20° à N50°, N60° à N90°, N120° à N140° et N350° à N315°.

En milieu cristallin et métamorphique, les zones aquifères se situent aux niveaux superficiels altérés (altérites et alluvions) et profonds de socle (fissures et/ou fractures). Ces aquifères sont, dans bien des cas, superposés et forment un même système aquifère (Dewandel *et al.* 2006). L'aquifère supérieur est formé par des matériaux semi-perméables au rôle capacitif. Il surmonte le deuxième niveau aquifère lié aux fissures (zone intermédiaire décomprimée), à perméabilité élevée. Le troisième niveau aquifère se trouve dans le substratum sain affecté par des fractures d'origine tectonique (failles). Cet aquifère profond de socle fissuré et fracturé est en général confiné, tout en étant par endroit drainant par rapport aux horizons supérieurs (Abdou Babaye *et al.* 2019). Les zones les plus fracturées contribuent donc à sa fonction, essentiellement conductrice. Dans cette zone, la profondeur de l'eau varie en fonction de la topographie, du type de nappe captée et des saisons. Les nappes superficielles se localisent dans les vallées (alluvions) et les plateaux (altérites). Les profondeurs d'eau varient de 1 à 10 m dans les puits traditionnels, captant les nappes superficielles alluvionnaires, tandis que dans des puits modernes captant les altérites ces profondeurs d'eau vont jusqu'à 15 voire 30 m sous la surface du sol. Ces nappes sont très réactives aux fluctuations pluviométriques (Ousmane 1988, Abdou Babaye *et al.* 2019) et peuvent tarir pendant la saison sèche conduisant à des problèmes récurrents de pénurie d'eau.

Les nappes profondes de socle sont en principe plus prometteuses en termes de productivité et de pérennité du fait du rôle que jouent les fractures pour la drainance, l'emmagasinement et la circulation des eaux souterraines. La profondeur des forages captant les nappes de socle varie de 36 à 120 m avec une moyenne de 60 m et un écart-type de 20 m. Les meilleurs débits sont observés généralement entre 30 et 65 m, 76% des venues d'eau sont observées dans les 50 premiers mètres constituant la partie supérieure du socle (Abdou Babaye, 2012). Au-delà de cette profondeur, les arrivées d'eau deviennent rares voire quasi-absentes. Sur les roches granitiques, la profondeur limite pour avoir un bon débit excède rarement 50 m, alors qu'elle peut atteindre 60 m et même être légèrement dépassée dans les roches vertes (schistes) du fait de la nature et de l'épaisseur de leurs produits d'altération. La diversité lithologique et les phases tectoniques variées influent sur les propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle et naturellement sur leurs productivités. L'analyse des données des coupes de forage révèle que les débits exploitables sont généralement faibles de l'ordre de 0,5 m³/h à 5 m³/h avec une majorité des forages se limitant à des valeurs inférieures à 2,5 m³/h. Dans les roches volcano-sédimentaires, des débits exploitables plus élevés (moyenne de 2,7 m³/h contre 1,9 m³/h dans les granitoïdes) sont observés. Des débits supérieurs à 10 m³/h ont été obtenus dans les forages réalisés au droit d'un réseau de fractures kilométriques.

Données et matériels

Les données utilisées dans cette étude comprennent la carte géologique de Tillabéry à l'échelle de 1/200000 (Abdou *et al.* 1998), l'image ASTER (scène) acquise le 15 mars 2007 (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>) et l'image Landsat (ETM+) (scène) du mois d'octobre 2010, mise à notre disposition par le Centre Régional Agrhymet (CRA). Le traitement et l'interprétation de ces images ont été faits à l'aide du logiciel ENVI 4.3.

Les données de terrain qui sont d'une part, les mesures de fracturation effectuées directement sur les affleurements ont porté sur la direction, l'ouverture et le remplissage quand cela est possible et les résistivités apparentes de terrains d'autre part.

Pour le traitement du champ de fracturation (nombre et orientation des fractures), issu de l'image ASTER et les fractures mesurées sur les affleurements, nous avons utilisé respectivement les logiciels Linwin et Excel. Quant aux données géophysiques, le logiciel 1XD a été utilisé pour leur traitement.

Traitement

Prétraitement des images

Les différents prétraitements appliqués sur une image satellite sont de nature radiométrique et géométrique. Ils permettent de restaurer et de redresser les distorsions et les dégradations radiométriques et géométriques acquises par l'image lors de son enregistrement. En raison du climat semi-aride de la région, et surtout que la prise de vue a été effectuée en saison sèche, cette image n'a pas fait l'objet de la correction radiométrique. Par contre, la correction géométrique est effectuée à partir des 8 points d'amer identifiés sur une image corrigée de la région.

Application des filtres directionnels de Sobel

Pour l'extraction des linéaments, Kouamé *et al.* (2006) ont démontré la bonne aptitude de la bande 6 d'image ASTER. De ce fait, nous avons utilisé cette bande pour l'étude des linéaments dans le bassin de Dargol. Pour accentuer les contrastes entre les structures de l'image, nous lui avons appliquée le filtre directionnel de Sobel de matrice 7 x 7 selon les orientations N-S, NE-SW, E-W et NW-SE (Tab. 1).

Pour chaque direction utilisée, le filtre accentue la direction qui lui est perpendiculaire. La figure 2 montre l'exemple d'une image brute (a) et d'une image filtrée (b) à partir du filtre Sobel N-S, mettant en relief les linéaments E-W.

Extraction manuelle des linéaments par analyse visuelle

L'extraction des linéaments peut se faire automatiquement par utilisation d'un algorithme mathématique (Hung *et al.* 2005, Ghazi 2013). Mais pour cette étude, nous avons utilisé l'approche par interprétation visuelle utilisée avec succès par plusieurs auteurs (Edet *et al.* 1998, Koussoubé *et al.* 2003, Kouamé *et al.* 2006, Youan Ta 2008, Abdou Babaye 2012, Illias *et al.* 2018).

L'extraction manuelle des discontinuités images a été réalisée sur la bande 6 d'image Aster issu du filtrage directionnel. Ce tracé des segments (linéaments) se fait directement sur l'écran en procédant à la fois à des grossissements localisés pour les structures difficilement observables. Cette opération met en œuvre les capacités d'observation et de raisonnement du photo-interprète, mais elle demande aussi, une bonne connaissance de la région pour un tri objectif et réaliste des phénomènes recherchés (linéaments structuraux).

Tableau 1. Matrice 7 x 7 des filtres directionnels de Sobel.
 Table 1. 7 x 7 matrix of Sobel directional filters.

N-S						
1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1

E-O						
-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	0	1	1	1

NE-SO						
0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

NO-SE						
2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	-1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2

Contrôle et validation

La phase de contrôle et de validation des structures linéaires, extraites à partir du traitement d'images, est nécessaire pour préciser leur signification structurale (Razack 1984, Koussoubé 1996). Avant de procéder au test de validation, les structures linéaires d'origine anthropique (routes, pistes, ...) ont été supprimées.

Ainsi, les tests de validation de ces linéaments ont consisté à la mise en relation des directions principales obtenues à partir des traitements d'images à celles des mesures microtectoniques effectuées sur les affleurements et les fractures issues de la carte géologique. Cette dernière renferme moins d'information que la carte des linéaments. Cela est dû à l'échelle très petite (1/200 000) de la carte géologique comparativement à celle de la zone d'étude. Les fractures observées sur la carte géologique ne sont que des fractures majeures et pourraient normalement être mises en évidence par cette méthode numérique.

Aussi, la carte des linéaments a été croisée avec celle d'occupation de sols. Pour ce faire, l'élément pris en compte est l'alignement des végétaux car leur existence et leur disposition indiquent la présence certaine d'humidité sur ces sols en majorité secs pendant la longue saison sèche.

La validation sur le terrain du couple fracturation - altération des roches a aussi été faite par des techniques géophysiques et les mesures microtectoniques sur quelques affleurements.

S'agissant des données de résistivité issues des traînés et sondages électriques, elles ont servi à repérer les fractures au sol, mais aussi de caractériser la nature et la puissance de leurs matériaux de remplissage.

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats et interprétations

Cartographie des linéaments

La figure 3 présente les résultats issus de l'extraction manuelle des linéaments issue de l'interprétation visuelle des images filtrées. Elle met en évidence la répartition spatiale des linéaments de tailles variables.

La rosace directionnelle (Fig. 4) montre que les directions majoritaires sont N-S (15%), N40°-60° (22%), N80°-100° (16%) et N140°-160° (17%). Parmi ces classes, deux directions principales N140°-160° et N40°-60° se démarquent des autres, rappelant ainsi les accidents régionaux libériens (NW-SE) et les directions NE-SW des grands couloirs de cisaillement (Abdou *et al.* 1998, Soumaila, 2000, Soumaila & Konaté 2005) structurés pendant l'orogénèse éburnéenne (Engalenc 1978). De nombreux filons (quartz, pegmatite et dolérite) et des fentes de tensions à biotite sont développés suivant les directions N-S, N70°-80° et N140°-160°. Ces filons une fois altérés, constituent des zones préférentielles d'infiltration et de circulation des eaux souterraines (Dassargues & Monjoie 1991). Les travaux de Engalenc (1981) dans le socle de l'Afrique de l'Ouest, ont montré

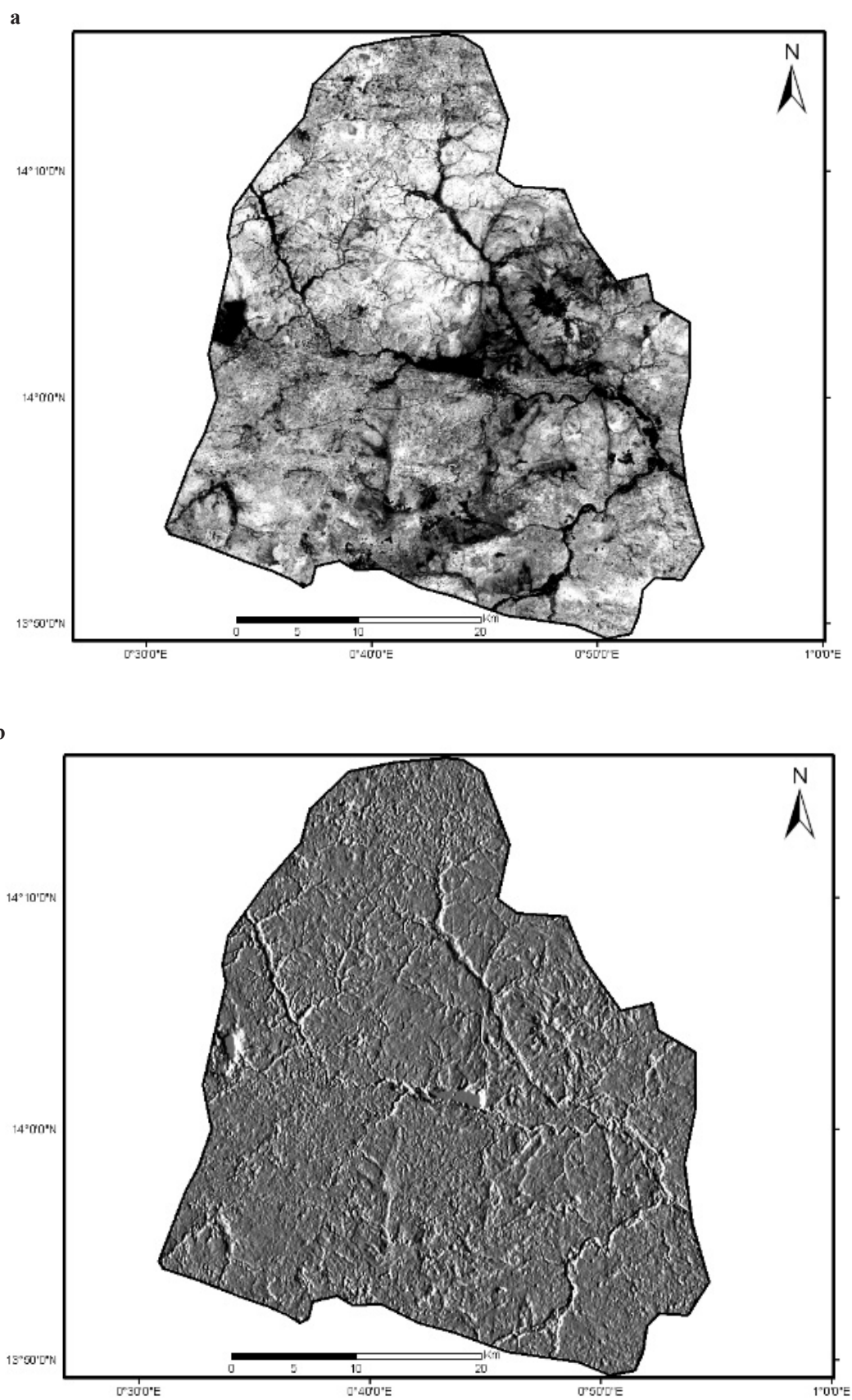


Figure 2. Image brute (a) et (b) issue du filtrage directionnel Sobel de direction E-O.
 Figure 2. Raw image (a) and (b) from Sobel directional filtering of E-W direction.

l'influence des roches filoniennes sur la réussite et la forte productivité des forages implantés dans les schistes birimiens.

L'étude de la distribution des directions des fractures mesurées sur le terrain confirme les principales directions observées sur l'imagerie satellitaire.

Corrélation linéaments - accidents tectoniques régionaux - alignements des végétaux

La superposition de la carte des linéaments aux données géologiques montre qu'il y a une corrélation entre ces deux types de données (Fig. 5). Les linéaments majeurs correspondent aux failles d'envergure régionale. En plus de cette similitude, la carte des linéaments est plus dense que celle des failles.

La distribution spatiale des linéaments fait ressortir une opposition entre le Nord et le Sud de la zone étudiée, due à l'influence du contexte géologique des terrains traversés et à l'influence des épisodes tectoniques qui ont affecté ces deux terrains (Dupuis *et al.* 1991). Selon Machens (1973), les reliques des roches libériennes, ainsi que les accidents liés à cette phase seraient conservés sur les massifs granitoïdiques. Cela est confirmé par la présence des fractures majeures de direction NW-SE dans la zone nord. En revanche, les directions NE-SW observées en bordure de ces massifs sont liées au développement d'une auréole de métamorphisme engendrée par le contact avec la ceinture des roches vertes. Sur cette dernière, toutes les fractures épousent la direction NE-SW du grand couloir de cisaillement de Téra.

La superposition de la carte des linéaments à celle d'occupation de sol a permis de mettre en évidence les coïncidences entre le cours d'eau et les grands traits tectoniques de la région. En plus, cette figure fait ressortir le

deuxième type des linéaments, caractérisé par l'alignement des végétaux (forêt galerie), localisé dans les vallées.

La triple relation linéament - eau - végétation montre que ce type des linéaments représente des fractures ouvertes où le stock d'eau permet une bonne croissance des végétaux (Savado 1984, Koussoubé 1996, Kouamé 1999, Koussoubé *et al.* 2003). Cette triple concordance représente un bon indice pour la recherche d'eau souterraine en zone de socle des milieux semi-arides où les végétaux ne sont présents que dans les zones humides signifiant que les failles sont hydrauliquement actives à ce niveau.

Les travaux de Koussoubé *et al.* (2003) dans le socle granitique du Burkina Faso, confirment que l'anomalie conductrice est très importante au niveau de ce type des linéaments.

L'influence du système de la tectonique sur le réseau de drainage a aussi été révélée dans le socle ivoirien (Kouamé 1999, Saley 2003) et nigérian (Edet *et al.* 1998). Les travaux de synthèse de Engalenc (1978, 1981) ont aussi mis en évidence cette relation. Selon cet auteur, l'altération qui se développe sur les zones les plus fracturées est à l'origine de plages humides favorisant le développement de la couverture végétale en zone sahélienne. De même, Ousmane (1988) démontre que l'orientation des cours d'eau du Liptako est régie par l'organisation structurale du socle sous-jacent. Dans la région de socle de Zinder (Sud-Est Niger), Karimoune *et al.* (1990) observent les directions NE-SW et NNW-SSE correspondant aux principaux axes de drainage. L'observation de la figure 6 montre que les cours d'eau épousent les deux directions majeures NW-SE et NE-SW correspondant aux directions libériennes et birimiennes du craton Ouest-Africain.

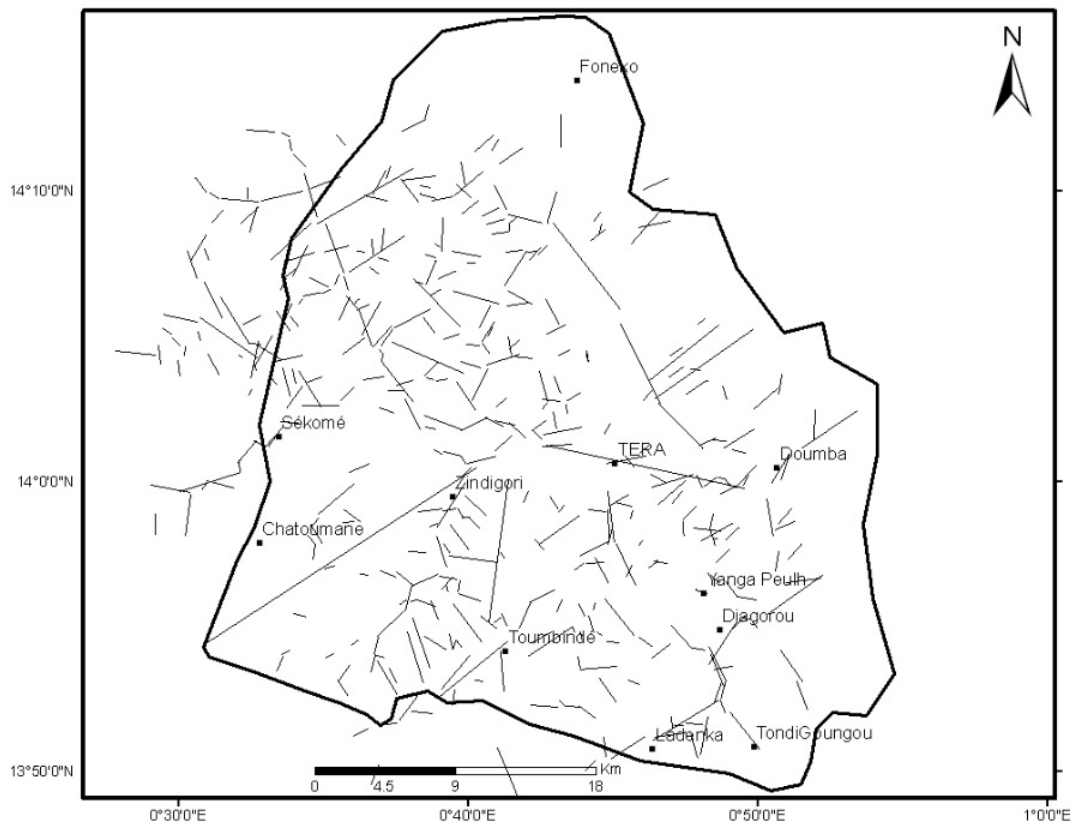


Figure 3. Carte des linéaments extraits à partir d'image satellite Aster.

Figure 3. Lineament map extracted from Aster satellite image.

Investigations géophysiques

La technique géophysique de résistivité électrique a été utilisée pour valider et repérer les linéaments au sol. Six sites

ont été investigués pour les traînés électriques (Tab. 2) dont trois d'entre eux ont fait l'objet des sondages électriques (Figs. 7–8).

Tableau 2. Sites de traîné et sondages électriques.
 Table 2. Dragging sites and electrical surveys.

Sites	Faciès	Profil	Points de faible ρ_a ($\Omega.m$)	Sondage
Doumba	Schiâtes	P ₁	10	SE ₁
		P ₄	32	-
Tilim	Schiâtes	P ₂	30	SE ₂
		P ₅	45	-
Téra	Granites	P ₆	55	-
Fogou	Granites	P ₃	150	SE ₃

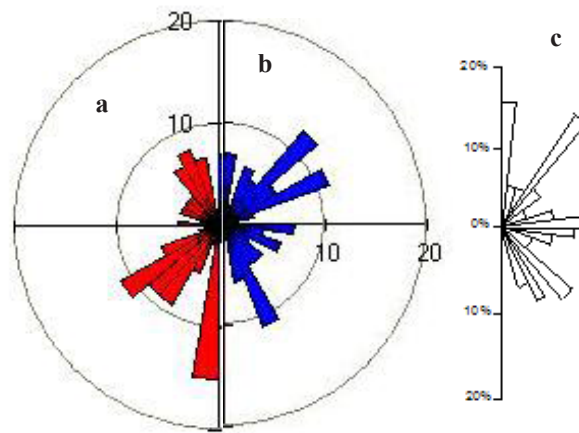


Figure 4. Distribution des directions des linéaments en nombre (a), longueurs cumulées (b) et des fractures relevées à l'affleurement c.
 Figure 4. Distribution of lineament directions in number (a), cumulative lengths (b) and fractures found at outcrop c.

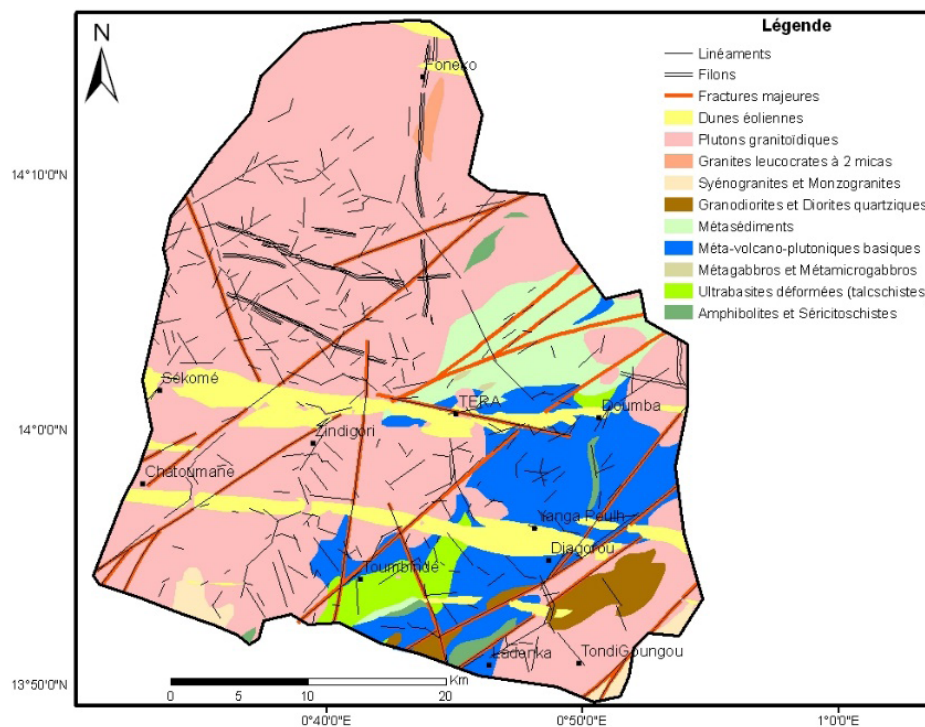


Figure 5. Relation linéaments et fractures issues des cartes géologiques.
 Figure 5. Relationship between lineaments and fractures from geological maps.

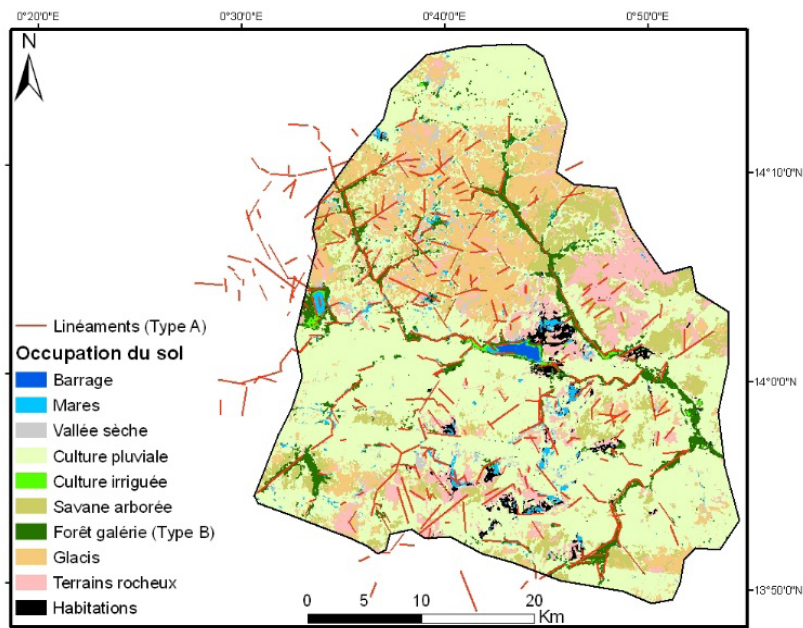


Figure 6. Relation indices biologiques et linéaments (*Image Landsat-7 d'octobre 2010*).
 Figure 6. Relationship between biological indices and lineaments (*Landsat-7 image of October 2010*).

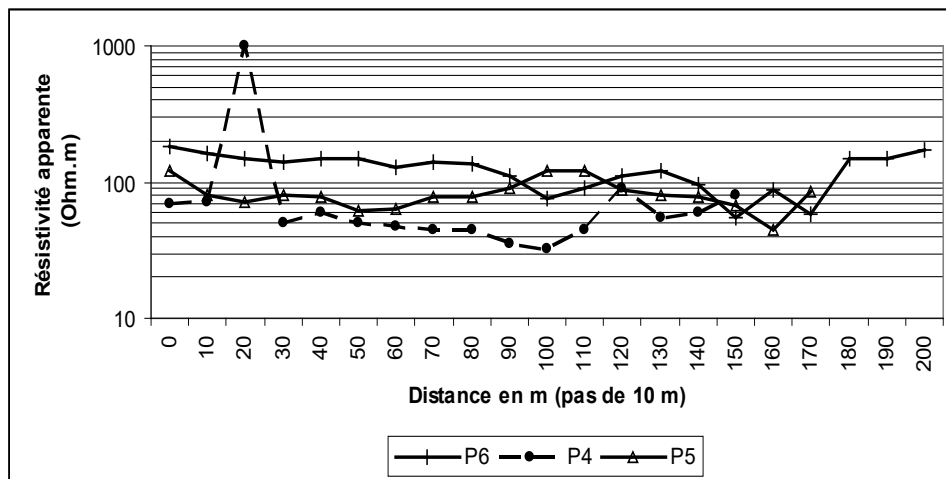
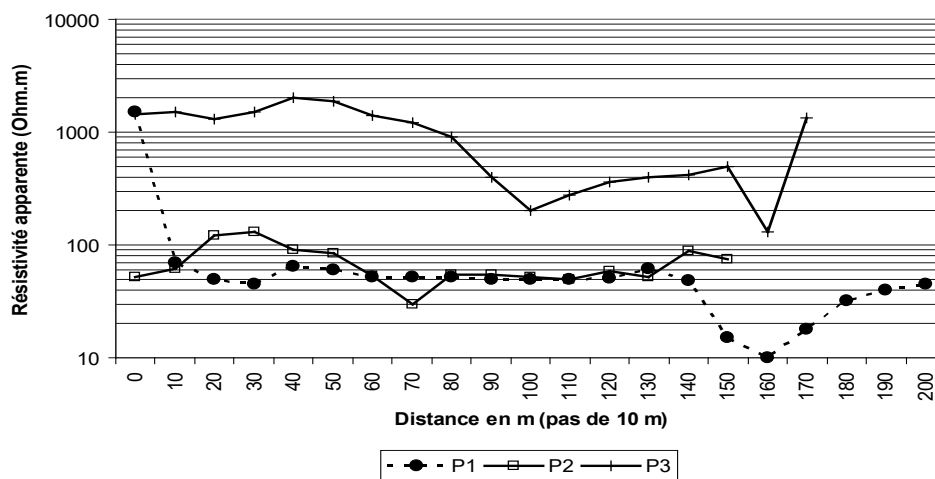


Figure 7. Profils de résistivité des sites prospectés.
 Figure 7. Resistivity profiles of surveyed sites.

Au niveau des sites de Doumba et Tilim, quatre profils de résistivité P_1 , P_2 , P_4 et P_5 ont été implantés pour préciser le passage de deux structures linéaires orientées $N45^\circ$ repérées sur l'image satellite. Ces profils réalisés selon la direction $N130^\circ$ présentent des allures irrégulières caractérisant des zones de forte et de faible résistivité en relation avec la résistivité du terrain traversé. Les zones de faible résistivité sont généralement associées à des failles à forte perméabilité, susceptibles de constituer un aquifère potentiel (Ball *et al.* 2010, Ruelleu *et al.* 2010). L'intérêt hydrogéologique de cette méthode est d'isoler les structures conductrice et résistante suivant une ligne donnée, mais elle ne permet pas de renseigner sur le nombre de terrain en présence et l'horizon décomprimé au toit de socle. Le pic observé sur le profil P_1 ($\rho_a = 1000 \Omega.m$) explique la présence d'un filon résistant associé à une zone conductrice (Ogier 1976).

Les sondages électriques (SE_1) effectués (figure 8), en ce qui concerne les anomalies conductrices des profils P_1 et P_2 ($\rho_{a1} = 10 \Omega.m$ et $\rho_{a2} = 30 \Omega.m$) ont donné des diagrammes en «fond de bateau» correspondant à la superposition des trois terrains (Koussoubé *et al.* 2003, 2006, Jourda 2005). Le premier, résistant, correspond au niveau sec de surface constitué par des dépôts sableux, des alluvions et/ou des carapaces latéritiques. La formation conductrice correspondant au deuxième niveau caractérise les altérites, et la portion montante représente le socle sain considéré comme infiniment résistant. Dans ces zones à faciès schisteux, le socle est estimé à une profondeur d'environ 25 à 30 m avec une valeur de résistivité supérieure à $500 \Omega.m$. Cette profondeur est dans le même ordre de grandeur avec celle fournie par les données des logs de forages environnants.

Les profils P_3 et P_6 d'orientation N-S sont implantés respectivement sur les sites de Fogou et de Téra pour mettre en évidence les structures linéaires de direction Nord-Est, proche de celle du tronçon de la rivière de Dargol. Sur le

profil de résistivité P_6 , il apparaît une anomalie conductrice ($\rho_a = 55 \Omega.m$). Le profil P_3 a une allure accidentée avec deux minima, le premier au point 100 m du profil et le second au point 160 m. Au début, la courbe montre une allure régulière, suivie d'une rupture de pente et une évolution traînante avant de remonter. Ce genre de courbe met en évidence la présence d'une zone conductrice au sein d'un complexe résistant. Ce profil traverse la vallée d'un cours d'eau passant au milieu des massifs granitiques subaffleurants. Le sondage SE_3 , réalisé au point 160 m ($\rho_a = 150 \Omega.m$), donne l'allure d'une courbe à une seule branche montante (Fig. 9). Cette courbe met en évidence la faible épaisseur de la couverture superficielle traduite par l'absence du niveau latéritique et du complexe argilo-sableux. Dans ce site, le modèle géophysique estime la présence du socle à environ 10 m de profondeur.

Ces interprétations ont fait ressortir la puissance d'altération observée par plusieurs auteurs sur le terrain schisteux (Engalenc 1978, 1981, Ousmane 1988, Lasm 2000, Koussoubé *et al.* 2006). Les logs de la figure 10 montrent leur degré d'altérabilité par rapport aux roches granitiques. Les sondages électriques verticaux indiquent que les altérations humides sont plus conductrices sur les roches schisteuses ou volcano-sédimentaires que sur les granitoïdes. Cette information est perceptible à partir des profils de résistivité qui donne une gamme de valeurs des anomalies conductrices de 50 à $200 \Omega.m$ dans les zones granitiques contre seulement $10 \Omega.m$ en moyenne en terrain schisteux (Koussoubé *et al.* 2003, 2006). Il est nécessaire de rappeler qu'une anomalie conductrice peut produire un forage négatif (Engalenc 1978, Ousmane 1988) si la fracture contient des roches argileuses (boue), ou si cette fracture se trouve en altitude (Savané 1997). À travers cette remarque, on constate que la géophysique n'est qu'une méthode d'investigation complémentaire, mais importante pour préciser le passage des structures linéaires (faille, filon, zone de contact) détectées par les images satellites.

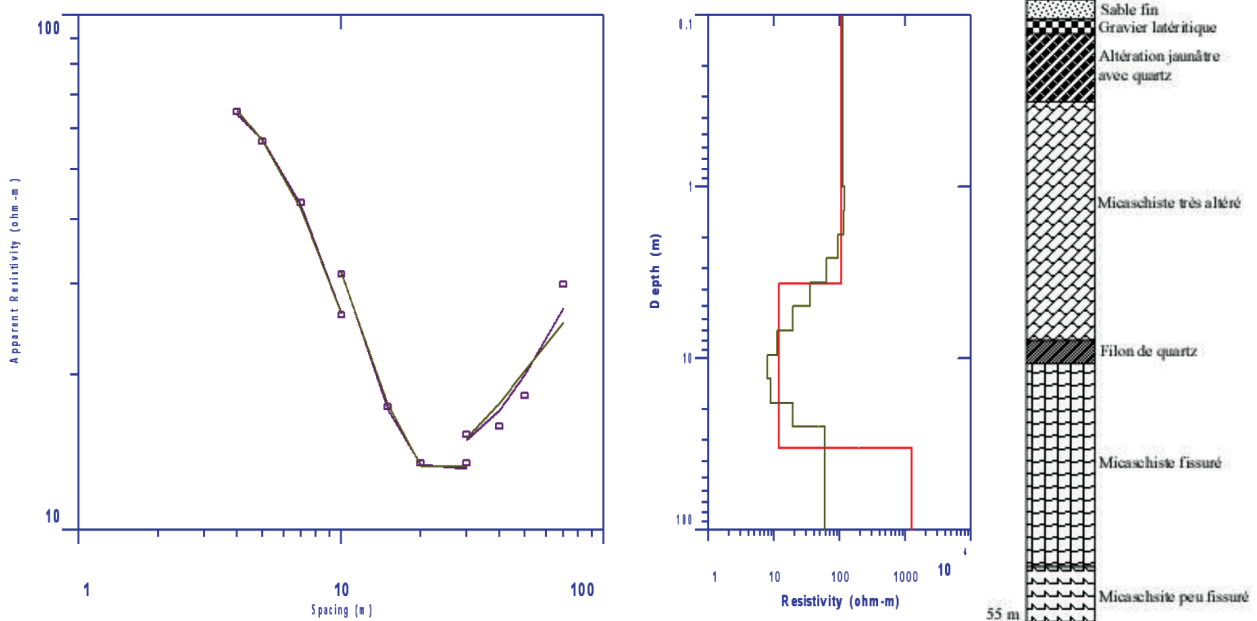


Figure 8. Courbe d'interprétation du sondage SE_1 de Doumba.
 Figure 8. Interpretation curve for DDH SE1 at Doumba.

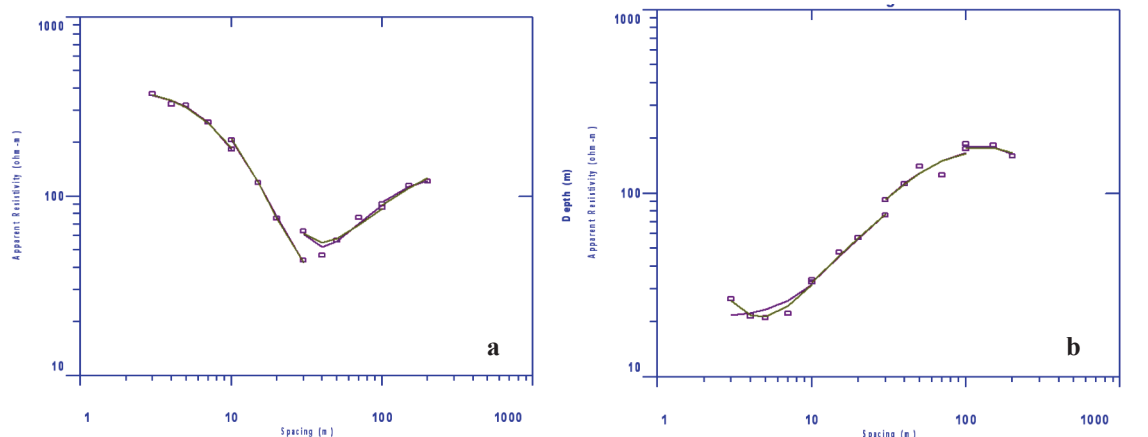


Figure 9. Courbe d'interprétation des sondages SE₂ de Tilim (a) et SE₃ de Fogou (b).
 Figure 9. Interpretation curve for boreholes SE₂ at Tilim (a) and SE₃ at Fogou (b).

DISCUSSION

Distribution directionnelle des fractures

La Figure 7 présente la distribution des principales directions de fractures, exprimées en pourcentage du nombre et de longueurs cumulées. La rosace directionnelle des fractures montre une distribution relativement homogène des principales directions observées.

La rosace portant sur le nombre de fractures (Fig. 4a), montre que parmi les différentes directions de fracturation mesurées, trois directions semblent prédominantes. Il s'agit des directions moyennes N45°, N65° et N150° qui présentent un pourcentage supérieur à 10%. De même la rosace représentant les longueurs cumulées de fractures présente la même tendance, mais avec toutefois une prépondérance de la direction N-S et un taux inférieur à 10% concernant la fracturation de direction 150 (fig. 4b).

Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence d'une corrélation linéaire forte entre l'intensité de fracturation en nombre et en longueurs cumulées des fractures (Razack 1984, Jalludin 1993, Lasm 2000, Jourda 2005, Youan Ta *et al.* 2008). Ainsi, l'analyse combinée de ces rosaces fait ressortir les principales directions de fracturation qui ont affecté le secteur d'étude, il s'agit des fractures : N-S à N20°, N40° à N50°, N70° à N80°, N100° à N110°, N130° à N140° et N160° à N175°. Ces différentes fracturations résultent des structurations successives du socle au Protérozoïque inférieur, moyen et supérieur. Toutes ces fracturations ont été à des degrés divers, réactivées lors de l'orogénèse panafricaine (Affaton *et al.* 2000).

Les directions générales majeures NW-SE et NE-SW concordent respectivement aux directions libériennes et éburnéennes rencontrées dans le socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest (Machens 1973, Ferré *et al.* 2001, Goki *et al.* 2011, Abubacar 2012).

Dans le Liptako, les grandes directions structurales observées sont constituées de quatre familles d'orientation N20° à N50°, N60° à N90°, N140° à N150° et N350° à N10° (Fig. 4c).

Accidents N20° à N50° : ils sont plus abondants sur les roches vertes. Néanmoins, ils sont aussi observés dans les zones de contact de la région de Téra. L'exemple type de cet accident se trouve dans la zone de Tchétchirey. Dans le pluton Téra - Ayorou, les zones affectées par cette déformation sont

de même direction que le pluton (Pons *et al.* 1995) et se manifestent par la formation des structures foliées (migmatites et gneiss). Au niveau des formations de la ceinture, on assiste à l'apparition des structures C-S avec une schistosité sigmoïde entre les plans de cisaillement (Soumaila & Konaté 2005).

Ces accidents N20° à N50° déterminent la direction structurale majeure marquée par la schistosité régionale S₁, les foliations et les grands couloirs de cisaillement dextre (Abdou *et al.* 1998, Soumaila 2000). Cette famille rappelle la direction birimienne (NE-SW) en référence à l'orogénèse éburnéenne qui a le plus marqué le domaine Baoulé-Mossi.

Accidents N60° à N90° : cette faille est observée dans la partie Nord de la zone, notamment sur le massif granitique. Les déformations de ce type ont un caractère polyphasé. Le fonctionnement de ces structures cisailantes dû à l'allongement NW-SE est responsable de la formation des mylonites à degré divers et des migmatites suite à une fusion partielle (Abdou *et al.* 1998). La réactivation de ces zones de cisaillement s'accompagne par les déformations cassantes tardives.

Accidents N140° à N150° : cette famille est surtout abondante dans le pluton de Téra - Ayorou, notamment dans les enclaves de migmatites (Machens 1973, Pons *et al.* 1995). C'est la direction qu'épousent les deux grands koris au nord du 14^e parallèle. Dans les régions de Begorou et de Tondigoungou, on observe une ouverture d'ordre centimétrique au niveau de cette famille de fractures. C'est certainement cette ouverture qui favorise le développement des forêts galeries (alignement des arbres dans la vallée) dans les deux affluents de Dargol de la partie Nord de Téra.

Ces accidents N140° à N150° constituent les premières générations des fractures structurées au cours de l'orogénèse libérienne et cette direction NW-SE est appelée direction libérienne (Machens 1973, Affaton *et al.* 2000). Ces fractures de direction proche de celle de la vallée du Niger présentent des caractéristiques de cisaillements senestres (Abdou *et al.* 1998) suite à l'allongement NE-SW favorisant leur remplissage par des injections doléritiques et pegmatitiques, mais aussi le remplissage des fentes de tensions N145° par du quartz laiteux (Affaton *et al.* 2000, Soumaila & Konaté 2005).

Accidents N350° à N10° : la majorité de ces structures est formée des veines de quartz et des quartzites. On les rencontre surtout sur les massifs granitoïdiques localisés au nord et au sud-Ouest de la zone d'étude. Ce sont des structures de décrochement affectant tout le Liptako (Deguen

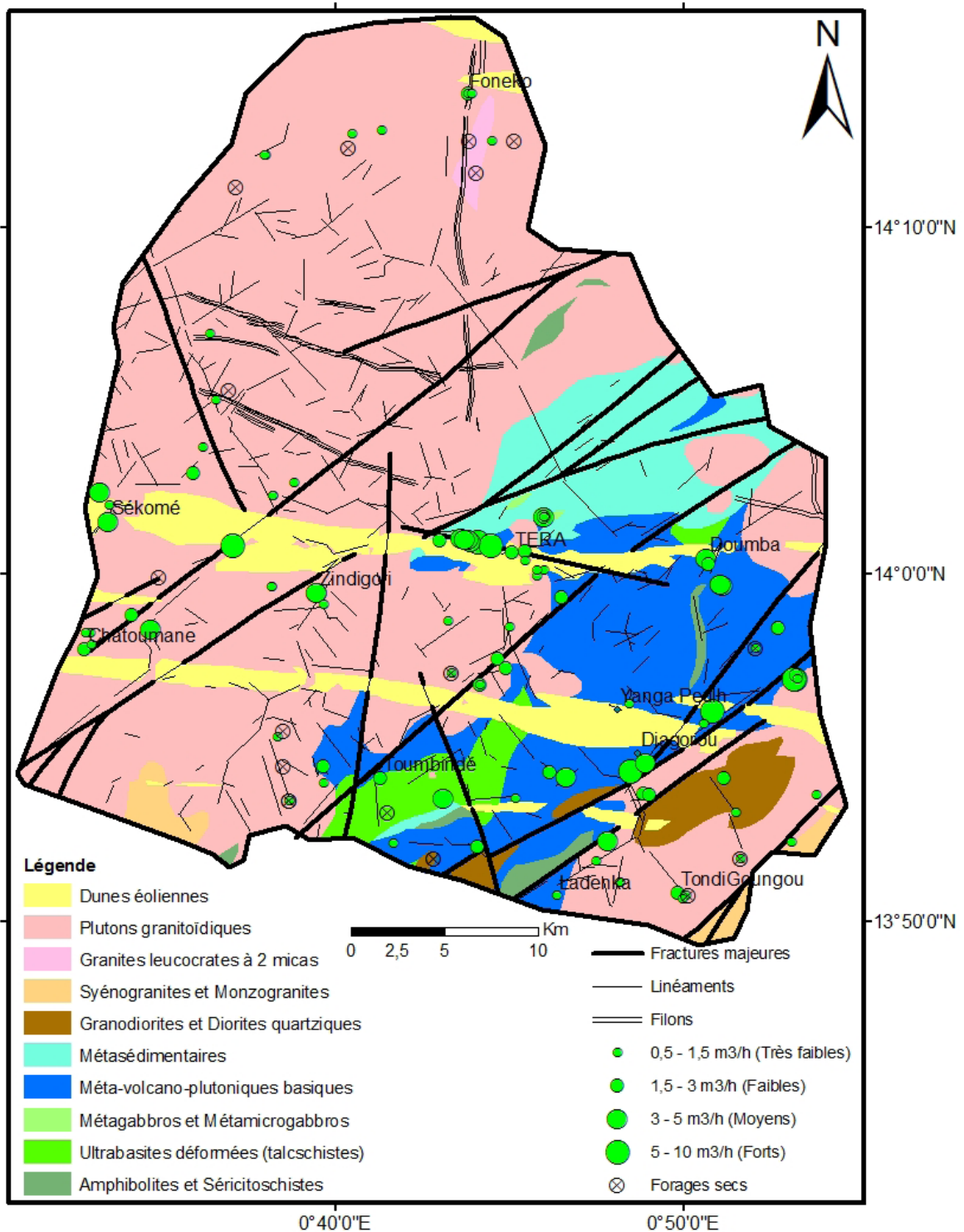


Figure 10. Relation productivité des ouvrages – lithologie – degrés de fracturation.
 Figure 10. Relationship between productivity of structures, lithology and fracturing.

et al. 1978, St-Julien 1992, Abdou *et al.* 1998). Ces directions s'apparentent à celle de la zone de cisaillement entre le massif de Téra - Ayorou et la ceinture de Gorouol.

Par ailleurs, les résultats de l'étude de la distribution des fractures sont comparables aux travaux menés par plusieurs auteurs dans le socle de l'Afrique de l'Ouest.

Ainsi, dans le socle précambrien de l'Etat de Cross River (Nigéria), Edet *et al.* (1998) ont mis en évidence les directions

NE-SW, N-S, et NW-SE, avec des variations mineures dans la direction E-W sur la base de l'interprétation de la photo-aérienne. Au Burkina Faso, l'analyse directionnelle à partir du support photographique, des images satellites et des données de terrain, confirme ces directions (Savado 1984, Nakolendousse 1991, Koussoubé 1996, Koussoubé *et al.* 2003, Yaméogo, 2008). Les mêmes conclusions ont été obtenues en Côte d'Ivoire et mieux certains auteurs (Faillat 1986, Kouamé *et al.* 2006, Niamké *et al.* 2008, Youan Ta *et*

al. 2008), ont mis en évidence la fréquence directionnelle des linéaments et les débits élevés des forages (Biemi 1992, Savané 1997).

Relation fracturation et productivité des ouvrages

Dans le bassin de Dargol, les débits des forages varient de 0,5 à 15 m³/h. La classe des débits moyens et forts est de 33%, ce qui est acceptable pour l'hydraulique villageoise. Les débits très faibles et faibles ont des taux respectifs de 35% et 32%. L'importance de ces dernières classes (67%) montre que le problème de l'approvisionnement en eau potable de la population et leur cheptel se pose encore avec beaucoup d'acuité dans cette zone. Par conséquent, des nouvelles investigations s'imposent afin de localiser les sites susceptibles de donner de forages à forts débits. Dans cette perspective, il a été dressé une carte multicouche (Fig. 10) permettant de tirer les renseignements suivants :

- Les forages à gros débits sont ceux implantés sur les nœuds des fractures ou proches de ceux-ci, et leurs volumes des débits semblent proportionnels aux tailles des fractures. Toutefois, la productivité des fractures est en fonction de leurs caractéristiques hydrauliques (Lasm 2000, Saley 2003, Kouadio *et al.* 2008).

- Dans le bassin de Dargol, les directions les plus productives sont principalement : NE-SW (N40 à N60), E-W (N70 à N100). Par contre, les directions NW-SE et N-S n'offrent que des débits modestes, généralement inférieurs à 2,5 m³/h. Ces principales directions de fracturation ont été mises en évidence par l'étude des images satellitaires et des observations de terrain.

- Les roches vertes (schistes) sont plus productives que les granitoïdes, cela pourrait s'expliquer par la présence d'importantes roches filoniennes (quartz, quartzites, microdiorites) ou des bancs de grès dans les schistes (Engalenc 1978), et par le rôle capacitif de ces roches dû à la grande puissance de la couche d'altérite.

- La direction d'allongement birrimien NE-SW, la plus productive, correspond au grand couloir de cisaillement (N45) du Liptako nigérien (Soumaila & Konaté 2005). La productivité relativement faible de la direction NE-SW, pourrait être liée aux colmatages de ces fractures par des injections doléritiques (Abdou *et al.* 1998), car l'altération de ces roches donne des produits argileux (Engalenc 1978).

CONCLUSION

Le traitement d'image a permis de mettre sur un fond cartographique les linéaments structuraux à partir du traitement d'image satellite. Ces accidents confirmés par l'étude de terrain et les données géologiques sont de directions majeures NW-SE et NE-SW, mais aussi des orientations secondaires N-S et E-W. Ces accidents seraient apparus au cours des orogénèses libérienne (2900–2500 Ma) et birimienne (2100–2400 Ma). Cependant, ils ont connu des phases de réactivation pendant l'orogénèse panafricaine (600 Ma).

La complexité géologique de la zone de socle a des conséquences sur la répartition de l'eau souterraine, si bien qu'une étude hydrogéologique à petite échelle est délicate. Une approche à grande échelle doit alors être envisagée pour mieux comprendre les caractéristiques fondamentales des aquifères de socle cristallin. C'est ainsi qu'une étude géophysique locale a été effectuée pour confirmer certaines hypothèses émises par l'étude des linéaments. Cette technique a permis de localiser les fractures correspondant aux anomalies conductrices sur le terrain, mais aussi d'estimer l'épaisseur

des couches d'altération qui couvrent le socle rocheux. À partir de différents sondages électriques, nous avons identifié la nature des couches de terrain représentées sur le site grâce à leur résistivité.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au soutien financier de la Coopération Technique Belge (CTB) et l'Université de Liège (ULg). Elle ne saura pas se réaliser sans l'aide logistique de l'Université Abdou Moumouni (UAM) à travers mon défunt Professeur Boureima OUSMANE à qui je dois beaucoup sur ma carrière universitaire. Nous leur exprimons notre profonde gratitude.

RÉFÉRENCES

- Abdou A., Bonnot H., Bory kadey D. *et al.* 1998. Notice explicative des cartes géologiques du Liptako à 1/100 000 et 1/200 000. Ministère des mines et de l'énergie du Niger, 64 p.
- Abdou Babaye M.S. 2012. *Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger)*. PhD thesis, Université de Liège, 244 p.
- Abdou Babaye M.S., Orban P., Ousmane B. *et al.* 2019. Characterization of recharge mechanisms in a Precambrian basement aquifer in semi-arid south-west Niger. *Hydrogeology Journal*, 27, 475–491.
- Abubakar Y.I. 2012. An integrated technique in delineating structures: A case study of the Kushaka schist belt, Northwestern Nigeria. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(5), 164–176.
- Affaton P., Gaviglio P. & Pharisat A. 2000. Réactivation du craton ouest-africain au Panafricain : paléocontraintes déduites de la fracturation des grès néoproterozoïques de Karey Gorou (Niger, Afrique de l'Ouest). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 331(9), 609–614.
- Amani A., Nguetora, M. 2002 Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In : Van Lannen H., Demuth S. (Eds.) - FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice. Proceedings of Friend Conference, Cape Town, South Africa, IAHS Publications, 274, pp. 449–456.
- Ball I.B., GE S., Caine J.S., Revil A. *et al.* 2010. Constraining fault-zone hydrogeology through integrated hydrological and geoelectrical analysis. *Hydrogeology Journal*, 18(5), 1057–1067.
- Berkowitz, B. 1995. Analysis of fracture network connectivity using percolation theory. *Mathematical. Geology*, 27(4), 467–483.
- Biemi J. 1992. *Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydro structurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat nationale, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493p.
- Boutt, D.F., Diggins, P. & Mabee, S. 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeology Journal*, 18, 1839–1854.
- BRGM 1980–1989. Etude hydrogéologique des plateaux calcaires de Haute-Saône. Etude particulière des secteurs de Champlitte et de Dampierre sur salon (70).
- Corgne S., Magagi R., Yergeau M. *et al.* 2010. An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semi-

- arid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1863–1875.
- Dassargues A. & Monjoie A. 1991. Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride. Ed., AUPELF-UREF, pp. 17–22.
- Deguen J., Guillon J.C., Makarsky J. *et al.* 1978. Interprétation du levé aéromagnétique exécuté sur la partie nigérienne du liptako - Gourma. TERRA Survey Ltd /ACDI, Contrat n° 380/00205, étude 7710, 233 p.
- Deslandes S. & Qwyn Q.H.G. 1991. Evaluation de spot et seasat pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectre de Fourier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 17, 98–110.
- Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R. *et al.* 2006. A generalized 3D hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330, 260–284.
- Dupuis D., Pons J. & Prošť A.E. 1991. Mise en place de plutons et caractérisation de la déformation birimienne au Niger occidental. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 312 (II), 769–776.
- Edet A.E., Okereke C.S., Teme S.C. *et al.* 1998. Application of remote-sensing data to groundwater exploration : A case study of the Cross River State, southeastern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 6, 394–404.
- Engalenc M. 1978. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH)-Géohydrologique, 318 p.
- Engalenc M. 1981. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines-Atlas de photo-interprétation. Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH)-Géohydrologique, Tome III. 38p.
- Faillat J.P. 1986. *Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques Languedoc, Montpellier, 480 p.
- Ferre E., Gleizes G. & Caby R. 2001. Obliquely convergent tectonics and granite emplacement in the Trans-Saharan belt of Eastern Nigeria: a synthesis. *Precambrian Research*, 114, pp 199–219.
- Ghazi T.R. 2013. Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their tectonic significance in some areas of Northern Iraq, using Remote Sensing Techniques and GIS. *International journal of enhanced research in science technology & engineering*, 2(2), 2319–2463.
- Goki N.G., Amadi A.N., Olasehinde P.I. *et al.* 2011. Appraising the structural geology of Kakuri Sheet 144: Implications for the tectonic evolution of the basement complex. *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(2), 26–36.
- Guiraud R. & Travi Y. 1990. Synthèse des connaissances de l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien. Université Avignon-CEFIGRE, 2ème Ed., 147 p.
- Holland M. & Witthüser K.T. 2011. Evaluation of geologic and geomorphologic influences on borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 19, 1065–1083.
- Hung L.Q., Batelaan O. & Smedt F. 2005. Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. In: *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V*. SPIE, 5983, 182–193.
- Illias A., Abdou Babaye M.S., Issoufou, S. *et al.* 2018. Apport des images ETM+ Et du Modèle Numérique de Terrain (MNT) à la cartographie des fractures en région montagneuse : Secteur de Timia (Massif de l'Aïr, Nord du Niger). *European Scientific Journal*, 14, 3–121
- IWACO B.V 1983. Projet hydraulique villageoise PHV/CE/PB, Dosso, Niger. Evaluation de la 3ème phase du PHV/CE/PB, Dosso, Niger 57.00118.
- Jalludin M. 1993. *Propriétés géométriques et hydrodynamiques des aquifères en milieux volcaniques fissurés sous climat aride. République de Djibouti*. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 261 p.
- 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), 403 p.
- Karimoune S., Ercicum M. & Ozer A., 1990. Le modelé éolien de la région de Zinder (Niger méridionale), étude de phytogéomorphologie, apport de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Edition. AUPELF-UREF, John Libbey, Paris.pp.145–162.
- Kouadio E.K., Savane I., Lasm T. *et al.* 2008. Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metamorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential. *European Journal of Scientific Research*, 22(3), 373–390.
- Kouamé K.F., Penven M.J., Kouadio B.H. *et al.* 2006. Contribution des images d'aster de terra et d'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 6(2), 103–121.
- Kouamé K.F. 1999. *Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi- montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale*. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université de Cocody (Abidjan), 194 p.
- Koussoubé Y. 1996. *Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga)*. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop, 210 p.
- Koussoubé Y., Savadogo A.N. & Nakolendoussé S. 2003. Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (Bassin versant de Bidi, province du Yatenga). *Télédétection*, 3(5), 419–427.
- Koussoubé Y., Savadogo A.N., Nakolendoussé S. *et al.* 2006. Efficience de trois méthodes d'investigation latérale dans la mise en évidence de contacts entre les formations géologiques du protérozoïque inférieur du Burkina Faso. *Journal des Sciences*, 6(2), 105–115.
- Lasm T. 2000. *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire Domaine Archéen*. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
- Machens E. 1973. Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. Mémo. BRGM, 82, 167 p.
- Nakolendoussé S. 1991. *Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso Géologie - Géophysique - Télédétection*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 256 p.
- Niamke K.H., Saley M.B., N'Dri B.E. *et al.* 2008. Contribution à l'interprétation des Linéaments par L'exploitation des Pseudo

- Images, de l'hydrographie en Région Tropicale Humide: Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 24(1), 74–93.
- Odling, N.E. 1997. Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway. *Journal of Structural Geology*, 19(10), 1257–1271.
- Ogier M. 1976. Etude géophysique par méthode électrique pour l'implantation de puits dans le Liptako nigérien (Niger). Convention F.A.C. Rapport BRGM 79 SGN 412 GPH, 59 p.
- Ousmane B. 1988. *Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est)*. Thèse de Doctorat, Université de Niamey, 175p.
- Panthou, G., Vischel, T. & Lebel, T. 2014. Recent trends in the regime of externe rainfall in the central Sahel. *International journal of climatology*, 34, 3998–4006
- Pons J., Barbey P., Dupuis D. *et al.* 1995. Mechanism of emplacement and structure of a 2,1 Ga juvenile continental crust : the Birimien of southwestern Niger. *Precambrian research*, 70, 281–301.
- Razack M. 1984. *Application de méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie*. Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Languedoc, 384 p.
- Rodney D., Tanguy A., & Vandembroucq D. 2011. Modeling the mechanics of amorphous solids at different length scale and time scale. *Modelling and Simulation in Materials Sciences and Engineering*, 19(8), 083001.
- Ruelleu S., Moreau F., Bour O. *et al.* 2010. Impact of gently dipping discontinuities on basement aquifer recharge: An example from Ploemeur Brittany, France). *Journal of Applied Geophysics*, 70, 161–168.
- Saley, M.B. 2003. *Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan), 209 p.
- Savadogo A.N. 1984. *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta-Etude régionale du bassin versant de la Sissili*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble 1, 350 p.
- Savané I. 1997. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odiénné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale*. Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan), 396 p.
- Soumaila A. 2000. *Étude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 253 p.
- Soumaila A. & Konate M. 2005. Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléo protérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Africa Geoscience Review*, 12(3), 161–178.
- St-Julien P. 1992. Etude structurale préliminaire des indices de Kourki, de Dounga, de Koussa et Borobon dans la ceinture de Gourouol (Liptako). Rapport trimestriel n°13,30P. Projet ACDI N° 700/10047, PBK Engineering Ltd, Annexes XII.
- Yameogo S. 2008. *Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité*, PhD thesis, University of Avignon and the Vaucluse, Avignon, 254 p.
- Yeh H.F., Lee C.H., Hsu K.H. *et al.* 2008. SIG pour l'évaluation de la zone de potentiel de recharge des eaux souterraines. *Environmental Geology*, 58, 185–195.
- Youan T.A.M., Lasm T., Jourda J.P. *et al.* 2008. Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 2, 34–42.

Manuscrit reçu le 06/09/2021

Version révisée acceptée le 17/03/2022

Version finale reçue le 19/03/2022

Mise en ligne le 22/03/2022