

Contribution de la géophysique à l'étude structurale et à l'identification des aquifères de fissures dans le Département de Dabakala (Centre-Nord Côte d'Ivoire)

[Contribution of geophysics in structural study and in identification of fissured aquifers in the department of Dabakala (North Central of Côte d'Ivoire)]

Kouassi Eric Germain Kouakou¹⁻², Théophile Lasm³, Boko Célestin Sombo¹, Marc Youan Ta³⁻⁴, Derving BAKA³, and Konan Emmanuel Kouadio³

¹Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody,
Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM),
Laboratoire de Géophysique Appliquée,
22 Bp: 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo,
Unité de Formation et de Recherche des Sciences biologiques,
B.P 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

³Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody,
Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM),
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE),
22 Bp: 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

⁴Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody,
Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM),
Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT)
22 Bp: 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The groundwater's exploitation located in the bedrock is one way indicated to provide water to population. Indeed, the aquifers of the fissured base constitute excellent water tanks. This article aims to determine the sites favorable to the establishment of drillings to good flows in the department of Dabakala. The methodological approach used is the combination of various geophysics methods and remote sensing. A card of morpho-structural alignments was established. This one highlighted two families of fractures hydraulically active of N70° and N120° direction. The electrical prospecting made it possible to strengthen the knowledge of the geological structure of underground for the water provision of 16 localities.

KEYWORDS: Fissured aquifer, Electrical prospecting, Basement, Remote sensing, Drilling, Dabakala, Ivory Coast.

RÉSUMÉ: L'exploitation des eaux souterraines en zone de socle est l'une des voies indiquées pour l'approvisionnement en eau des populations. En effet, les aquifères du socle fissuré constituent d'excellents réservoirs d'eau. L'objectif de ce travail est de déterminer les sites favorables à l'implantation de forages à bon débits dans le département de Dabakala. L'approche méthodologique utilisée est la combinaison des méthodes géophysiques et de télédétection. Une carte des alignements

morpho-structuraux a été établie. Celle-ci a mis en évidence deux familles de fractures hydrauliquement actives d'orientation N70° et N120°. La prospection électrique a permis de renforcer la connaissance de la structure géologique du sous-sol pour l'approvisionnement en eau de 16 localités.

MOTS-CLEFS: aquifère de fissure, prospection électrique, socle, télédétection, forage, Dabakala, Côte d'Ivoire

1 INTRODUCTION

Le département de Dabakala connaît des difficultés d'accessibilité aux ressources en eau souterraine. En effet les ouvrages hydrauliques sont peu nombreux avec des débits généralement faibles. Les besoins en eau de cette région sont importants et nécessitent la réalisation de nombreux forages. Le déficit en eau des populations est estimé à 54 448 m³/jour). La connaissance du réseau de fractures constituant les principaux axes-d'écoulements souterrains, il est fondamental pour la recherche des eaux souterraines [17], [34], [12], [33]. Ce travail a nécessité l'usage de méthodes de télédétection et de géophysique pour la prospection des eaux souterraines du département. L'usage des techniques de télédétection constitue une approche fiable dans la détection et la cartographie des réseaux de fractures. La géophysique en général et la prospection électrique en particulier, viennent en complément des études par imagerie satellitaire. En effet, elle permet de déterminer avec une meilleure précision le positionnement de la discontinuité tectonique et de localiser les zones d'intérêt hydrogéologique. L'objectif est de cartographier les réseaux de fractures en vue d'un meilleur approvisionnement des populations en eau potable.

2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU DEPARTEMENT DE DABAKALA

Le département de Dabakala est situé au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. Il est compris entre les longitudes 4° et 5° W et les latitudes 8° et 9° N (Fig. 1). Du nord au sud, la végétation passe de la savane arborée à la savane boisée. Elle est sévèrement dégradée par les feux de brousse des saisons sèches, occasionnés par les activités champêtres et/ou de chasses. La zone d'étude est à cheval entre les bassins versants du N'Zi et du Kinkéné (affluent du Comoé). La pluviométrie moyenne annuelle sur la chronique de 1951 à 2000 est de 1200 mm [15]. Le relief est monotone avec des altitudes variant de 100 à 650 m.

Le sous-sol est constitué de roches cristallines (granites et granodiorite), métamorphiques (migmatites) et de roches volcano-sédimentaires (métasédiments, métavulcanites et schistes) (Fig. 1). Parmi les granites, on distingue les granites à biotites, les leucogranites, les granites hyperalcalins (type sarala) et les granites porphyroïdes. La zone de Dabakala est à cheval sur trois sillons : Katiola à l'Ouest, Bouaké au Sud et Téhini à l'Est. Cette région a été le siège de trois déformations majeures senestres d'orientation NS pour les deux premières et WNW-ESE pour la dernière [7], [8]. On enregistre aussi localement la présence de zones de cisaillement senestres orientée WNW-ESE et dextre de direction NE-SW.

Au plan hydrogéologique, on distingue les réservoirs d'altérites, de fissures et de failles comme partout en zone de socle de Côte d'Ivoire [32], [1], [5]. Les aquifères des altérites sont superficiels et proviennent de l'altération de la roche-mère compacte ou fracturées. Les aquifères de fissures ou de fractures sont plus profonds. Ils sont mis en place à la faveur d'évènements tectoniques et sont constitués de fractures ouvertes et interconnectées dans lesquelles l'eau circule et s'emmagasine. La présence d'un aquifère de socle est donc subordonnée à l'existence d'une fissuration et/ou d'une altération. Autrement dit l'emmagasinement d'eau n'est possible que si les roches ont été soumises à des transformations postérieures à leurs genèses qui sont d'ordre météorique ou tectonique [17].

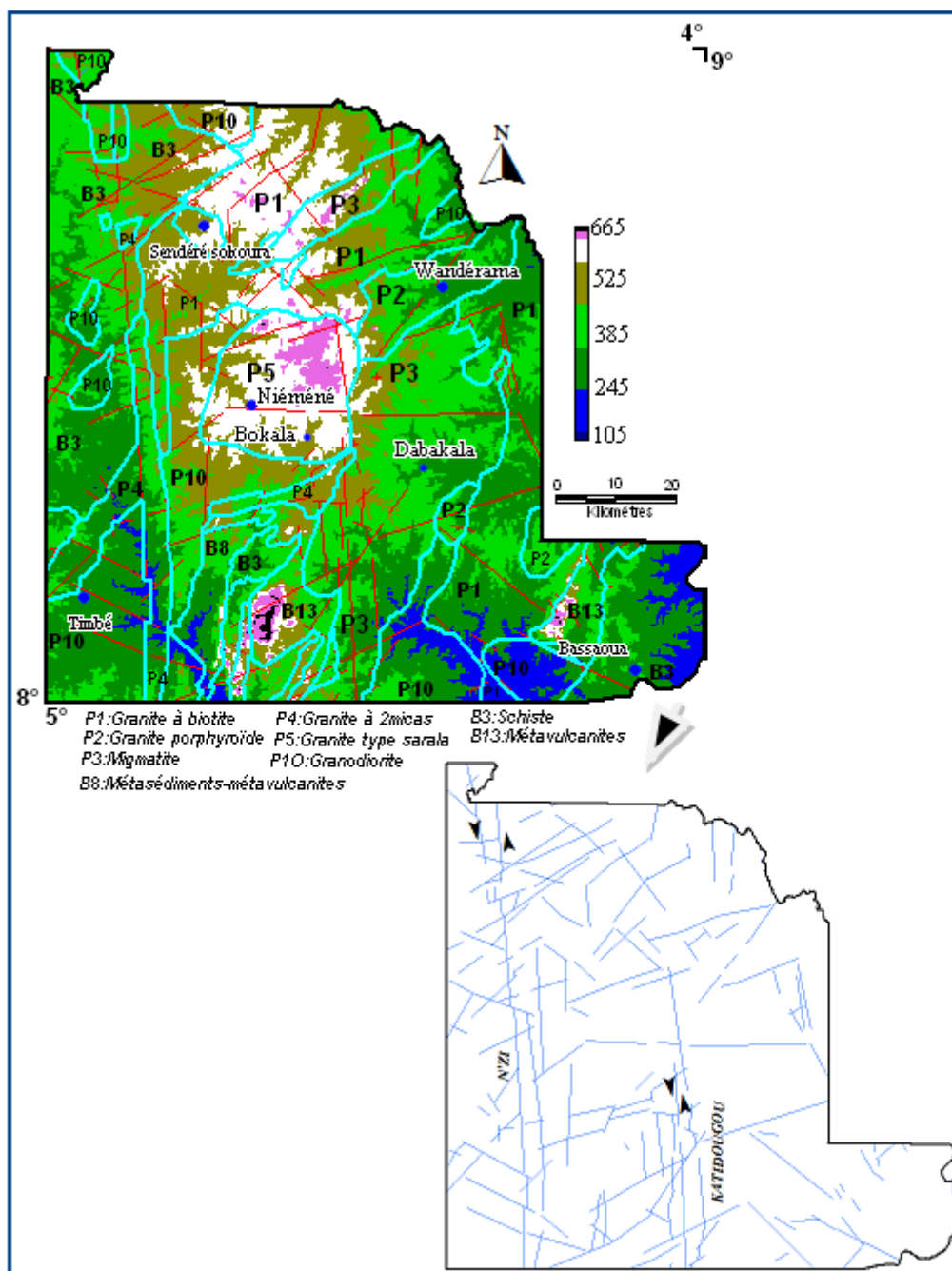


Fig. 1 Contours géologiques superposé au MNA de Dabakala.

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 MATERIELS ET DONNEES

Pour cette étude, la scène (196 ; 54) d'une image satellite Landsat-7 ETM+, acquise le 29 janvier 2002 a été utilisée. De plus, des cartes topographique, géologique et aéromagnétique, toutes à l'échelle 1/200 000 ont été traitées. Enfin, des fiches techniques de forages comportant des informations relatives aux niveaux statiques de l'eau, aux débits air-lift, aux profondeurs de forage, aux arrivées d'eau, etc. ont été exploitées. Ces fiches ont été fournies par la Direction Territoriale de l'Hydraulique (DTH) de Bouaké.

Le matériel d'acquisition des données géophysiques utilisé est constitué d'un résistivimètre de type Syscal junior avec ses accessoires (des bobines de raccordement, les électrodes, un hectomètre, des masses, une boussole, un GPS, etc.). Celui de traitement des données se compose de logiciels de cartographie (Mapinfo Professional 7.5), de traitement d'images (Envi 4.1) et de traitement géophysique (Ipi2win, Qwseln).

3.2 METHODOLOGIE

L'approvisionnement en eau potable (AEP) nécessite des cartes structurales de grandes précisions. Les familles de discontinuités se définissent par leur orientation, leur ouverture, leur persistance, leur densité ainsi que par leur origine géologique [26]. L'étude de la fracturation est essentielle et consiste à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique des aquifères discontinus.

3.2.1 CARTOGRAPHIE DES DISCONTINUITES PAR AEROMAGNETISME

Elle est élaborée à partir des cartes aéromagnétiques et des images satellitaires ETM+. Le traitement et l'interprétation des données aéromagnétiques permet de mettre en évidence des discontinuités susceptibles de constituer des guides pour les prospections hydrogéologiques [22], [30]. L'extraction des discontinuités (fissures, failles) sur les cartes aéromagnétiques est basée sur la répartition des anomalies magnétiques. Il faut tenir compte des différentes signatures des structures magnétiques comme les failles et les zones de contacts. Les failles se manifestent par un mouvement latéral (déplacement latéral de l'axe d'allongement des anomalies magnétiques) et un mouvement vertical (gradient important au-dessus du plan de faille). Les contacts géologiques se manifestent par un changement de comportement du champ magnétique qui passe d'un état perturbé à un état calme ou vice-versa. Ils sont généralement indiqués par le gradient plus ou moins fort des lignes de contour [9]. Le couplage des cartes aéromagnétique, géologique et topographique permet de mettre en évidence certaines discontinuités. Le tracé des fractures a été réalisé de façon manuelle.

3.2.2 CARTOGRAPHIE DES STRUCTURES LINEAMENTAIRES PAR TELEDETECTION

De nombreuses études hydrogéologiques [27], [3], [28], [16], [18], [11], [13], [34], [14] ont démontré la nécessité d'utiliser les images satellitaires pour cartographier les fractures d'origine tectonique. Les techniques de rehaussement mises en œuvre dont l'ACP et le filtrage spatial ont largement fait leur preuve en région tropicale humide [23]. Cela a consisté à séparer au maximum les informations afin d'obtenir un canal spécifiques aux hautes fréquences. Le filtrage spatial utilisé est de type directionnel (Sobel 7×7). Cette dernière approche a eu pour objectif de mieux distinguer les linéaments. Le relevé des linéaments structuraux se fait manuellement.

Les linéaments et les éléments structuraux cartographiés sont par la suite validés par les connaissances de terrain, les cartes photo-géologiques et géologiques existantes. Les travaux de différents auteurs [29], [19], [20], [8] ont été utilisés pour confronter les résultats obtenus. Au cours de la phase de validation, les linéaments ayant une origine autre que tectonique sont supprimés. Il s'agit des routes, pistes, lignes de transport d'énergie, etc. Les linéaments retenus ont donc une valeur de fracturation.

3.2.3 STRATEGIE DE PROSPECTION

La télédétection et la géophysique (méthode de résistivité électrique) apportent une contribution précieuse dans la localisation des zones d'altération, des failles, des dysharmonies, qui sont autant de zones favorables à la présence d'eau dans les roches. L'étude prospective comporte deux volets d'investigations. Le premier est composé de l'examen géomorphologique et de la mise en œuvre des méthodes électriques (traîné et sondage électriques) sur le terrain. Le second repose sur le choix de sites -d'implantation de forages.

Les méthodes géophysiques mesurent les paramètres physiques du sous-sol à partir de la surface. Celle des résistivités électriques consiste à injecter un courant continu dans le sol à l'aide d'électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel entre deux autres électrodes M et N compris entre A et B. Les levés par traîné électriques permettent une investigation latérale en vue de déterminer les discontinuités dans le socle, tandis que les sondages électriques permettent de mieux appréhender la succession des couches de terrains [4], [16]. Dans le cadre de cette étude, les traînés électriques ont été effectués selon le dispositif gradient rectangle avec les caractéristiques géométriques suivantes : AB = 500m et 300m, MN = 20 m et quelques fois le dispositif Schlumberger (AB = 200 ; MN = 20). Le pas de mesure est de 10 m. Les sondages électriques ont été effectués selon le dispositif Schlumberger, au droit des anomalies de résistivité apparente déterminées

par traîné électrique. Les données acquises avec ces deux techniques permettent de construire des profils de résistivité et des sondages électriques.

4 RESULTATS

4.1 ANALYSE DES DISCONTINUITES MAGNETIQUES

La cartographie des failles et fractures basée sur leur signature magnétique a permis de disposer d'une carte qui est une représentation des discontinuités magnétiques (Fig. 2). La rosace directionnelle associée à cette carte est également illustrée par le schéma 2. Seule la famille de fractures N00-10 dépasse les 10% en fréquence. Après suivent les familles N170-180 et N80-110.

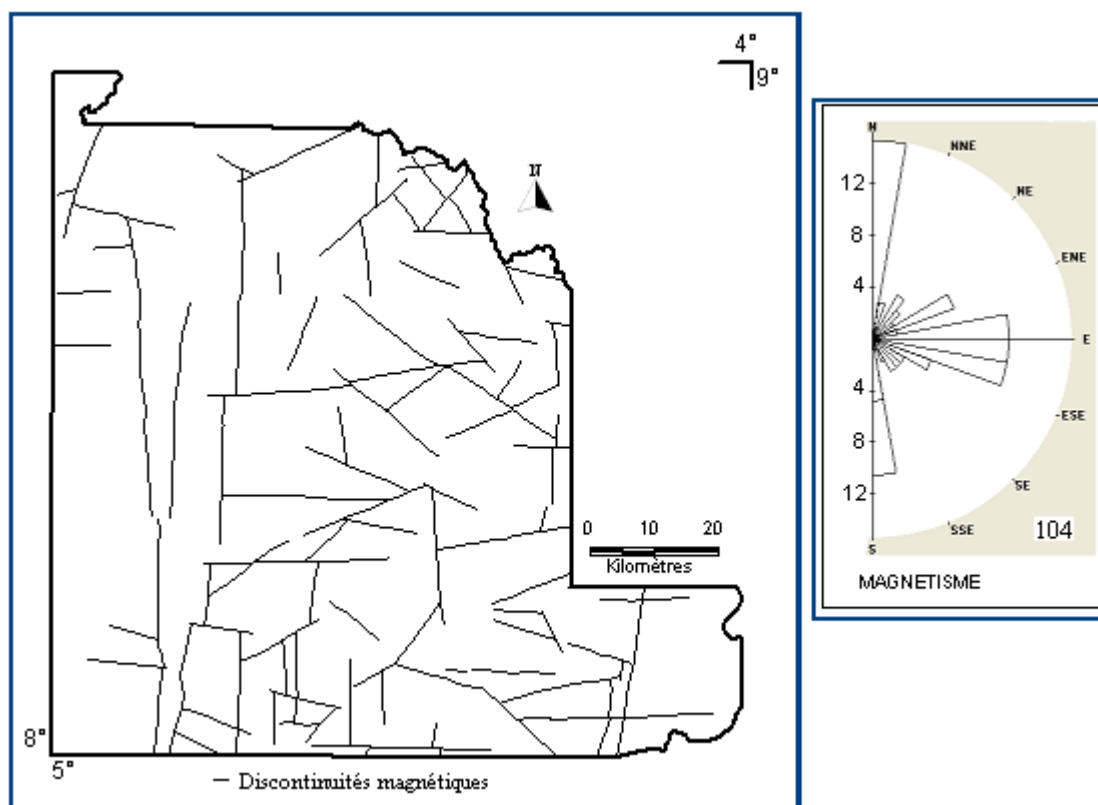


Fig. 2. Carte des discontinuités magnétiques de Dabakala et rosace directionnelle

4.2 ANALYSE DES LINEAMENTS

La méthodologie appliquée pour le traitement des images satellitaires a permis de cartographier les linéaments majeurs de Dabakala (Fig. 3). L'analyse du réseau linéamentaire indique que la classe NS constitue la direction majeure. Les directions secondaires sont N110°-120 et N170-180 (Fig. 4).

4.3 ANALYSE COMPARATIVE ENTRE LA CARTE DE LINEAMENTS ET DE DONNEES DE GEOLOGIE STRUCTURALE

La superposition de la fracturation issue de la télédétection et celle de la carte géologique met en évidence une certaine concordance des fractures identifiées. En effet, les linéaments issus de l'imagerie satellitaire sont souvent plus ou moins superposés aux éléments structuraux du terrain ou encore sont dans le prolongement de ces derniers (Fig. 3). De nombreuses fractures jusque-là inconnues dans la base de données de cette région ont pu être mises en évidence. Les fractures célèbres comme les cisaillements NS du N'Zi et de Katidoukou ont été identifiées. Cependant certaines structures géologiques n'ont pas pu être identifiées sur les images satellitaires.

Les rosaces directionnelles des cartes de fracturation et celle obtenue par télédétection sont illustrées à la figure 4. Sur ces rosaces, on observe d'une manière générale que la fracturation est presque homogène. En effet, en dehors de la famille de fractures NS (N170-180, N00-10), aucune famille de fractures ne dépasse 10 % en fréquence. Les fractures cartographiées par télédétection ont été confirmées par les données de terrain (Fig. 4). Cette différence observée au niveau de ces rosaces s'explique comme nous l'avons souligné, par la taille du support étudié. En effet, les images satellites couvrent de vastes surfaces géographiques comparativement aux investigations de terrain.

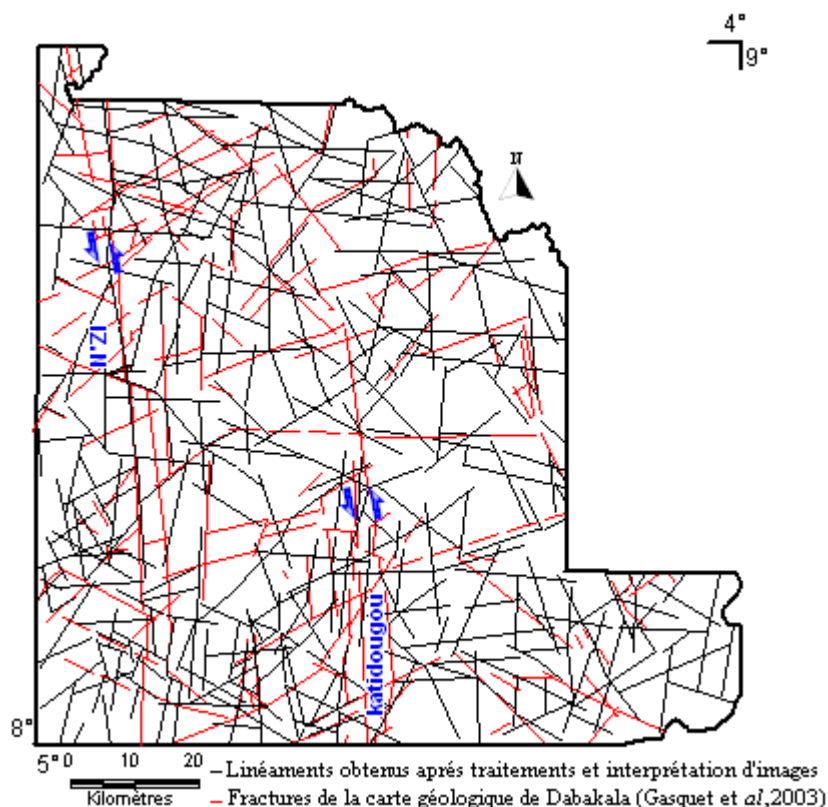


Fig. 3. Comparaison de la carte de linéaments interprétés de la zone test à celle des études antérieures.

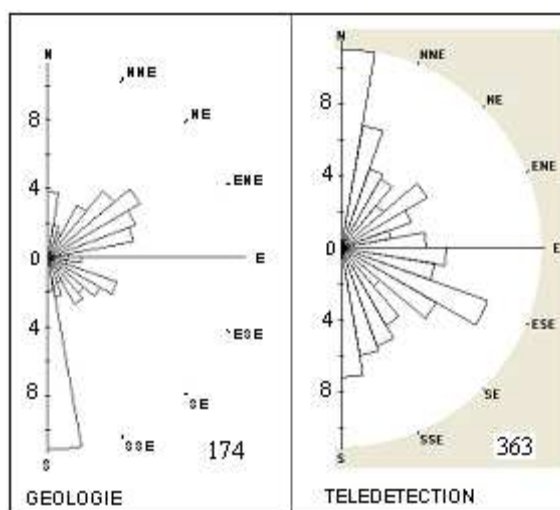


Fig. 4. Comparaison des rosaces des différents supports

La figure 5 met en évidence la relation existant entre la nature lithologique des formations et le réseau de fractures cartographiés par télédétection. Les linéaments d'orientation NNE-SSW pourraient être interprétés comme des anomalies

d'origine structurale ou lithologique. En effet, ces orientations s'apparentent à celle de la foliation et de la linéation minérale subverticale relevées dans les zones de contact (NNE-SSW et NNW-SSW) suivant les grandes directions de déformation.

Il ressort des analyses que malgré les quelques différences, les résultats de cette étude correspondent à des structures déjà existantes. Ces structures ont été identifiées avec une meilleure précision. Notons que l'orientation préférentielle NS mise en évidence sur les différents supports correspond aussi à celle des fractures d'origine géologiques. La confrontation des résultats à celles des données existantes a permis de faire un lien géologique entre les différents éléments et de faciliter leur interprétation :

- certains linéaments cartographiés ont été identifiés et reconnus sur le terrain comme étant des discontinuités tectoniques (failles ou des fractures);
- les linéaments majeurs sont liés à des failles mises en place dans les profondeurs et associés aux grands mouvements tectoniques à l'échelle régionale [10].
- Les linéaments mineurs sont liés à des phénomènes géologiques locaux (mise en place d'intrusions rocheuses, déformations et plissements locaux).

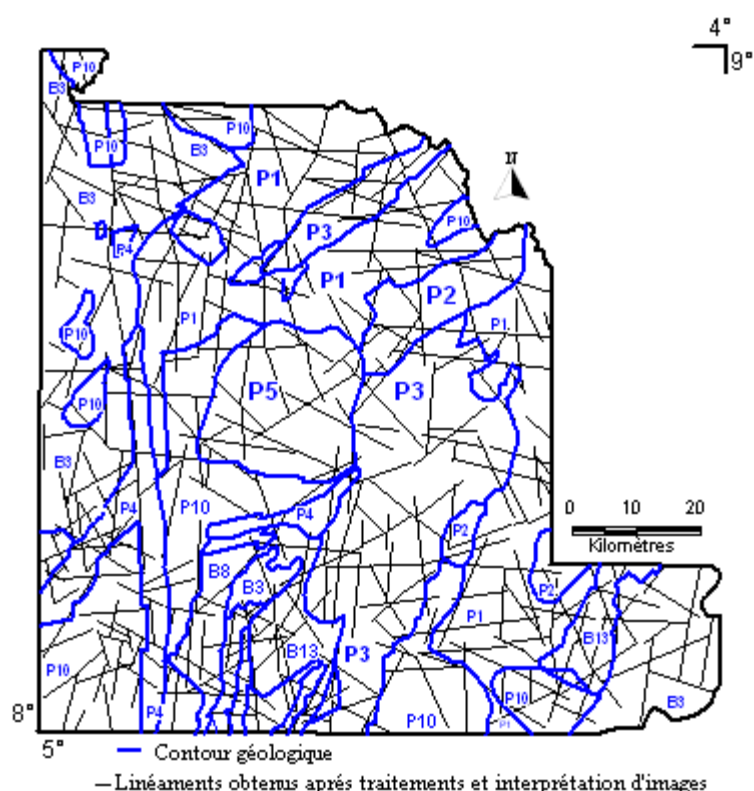


Fig. 5. Comparaison de la carte de linéaments et de la carte géologique de Dabakala.

P1. Granite à biotite ; P2. Granite porphyroïde ; P3. Migmatite ; P4. Granite à micas ; P5. Granite type Sarala ; P10. Granodiorite ; B3. Schistes ; B8. Métasédiments-métavulcanites ; B13. Métavulcanite

4.4 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE STRUCTURALE

La synthèse des travaux et de l'étude structurale effectuée par [8] dans le département de Dabakala indiquent que la fracturation affecte les terrains sur plusieurs kilomètres et les linéaments repérés s'organisent selon les orientations NS et N 90 (Fig. 6). Cette fracturation est à mettre en relation avec la tectonique régionale. Par ailleurs, les réseaux de fractures N 70° et N 110° déjà repérés par [6] affectent les granites à biotite et les schistes. Ces fractures sont peu représentées dans la zone au niveau régional mais prépondérante à l'échelle locale.

L'usage des données issues des images satellitaires et aéromagnétiques dans la prospection hydrogéologique a donné des résultats probants malgré les limites de ces méthodes (difficulté de détection des linéaments sous les fortes épaisseurs d'altération et les fractures non injectées de roches à susceptibilité magnétique élevée [24]. La confrontation des deux supports a permis d'élaborer un schéma structural précis (Fig. 7).

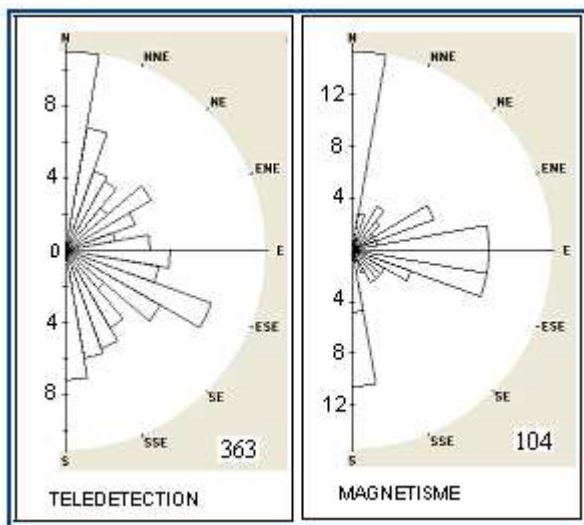


Fig. 6. Rosaces issues des différents traitements

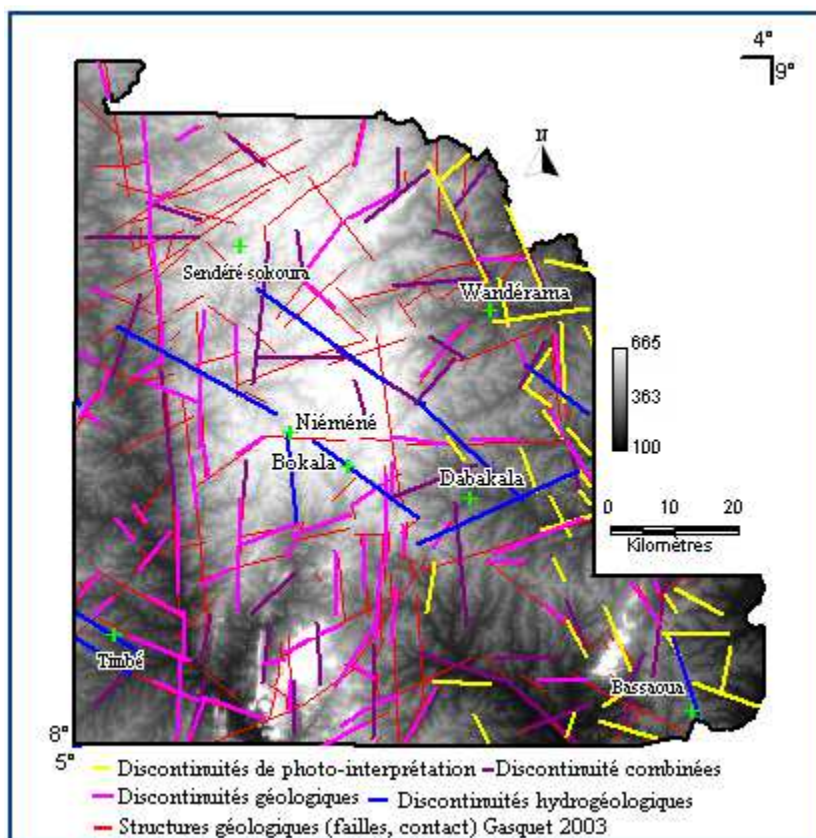


Fig. 7. Schéma structural combiné sur fond MNT du département de Dabakala.

Les linéaments satellitaires et les discontinuités magnétiques ont été comparées aux données de la carte géologique, de photo-interprétation et de forages. Les linéaments identifiés à la fois par télédétection et aéromagnétisme sont en couleur

violet. Les accidents confirmés par un tracé géologique (faille ou contact), par une discontinuité de photo-interprétation ou par forages sont soulignés respectivement par les couleurs rose, jaune et bleue.

Cette carte de la figure 7 met en évidence l'importance régionale des orientations méridionales NS. Plusieurs discontinuités magnétiques de même orientation, parfois soulignées par la télédétection sont ainsi mises en évidence dans la partie ouest de la zone d'étude, au niveau d'un couloir de 30 à 50 km de large. Cette déformation transpressive post-archéenne est le résultat d'un aplatissement et d'un cisaillement [8]. Elle a affecté le socle cristallin de Dabakala qui présente de nombreux témoins de cette déformation. La fracturation E-W, correspondant à des décrochements dextres reste mal représentée dans la zone étudiée.

La direction NE-SW confirmée par la géologie marque l'influence de l'orogénèse éburnéenne. Cette deuxième direction est bien visible à l'ouest et au Nord-ouest de la zone d'étude.

La direction NW-SE, visible au Sud de Dabakala est signalée à la fois par les deux méthodes et confirmée par la géologie. Cette direction serait due à des fractures profondes.

4.5 RESULTATS DES CAMPAGNES GEOPHYSIQUES

4.5.1 RESULTATS DE LA METHODE GEOMORPHOLOGIE ET GEOPHYSIQUE

Traîné électrique et sondage électrique ont été réalisés à Kassembélé (Azimut : 140°, AB=200 m, MN=20 m). Le profil de la figure 8 permet l'investigation d'une profondeur de 25 m en moyenne. Il montre une première zone de 0 à 30 m caractérisée par une anomalie de type "U" (649 Ω .m). Entre les abscisses 90 et 170 m, la seconde zone représente un substratum très fracturé. Elle est caractérisée par des résistivités oscillant entre 500 et 1220 Ω .m et des anomalies "V" et "U".

Pour vérifier la succession verticale de terrain et connaître l'intérêt hydrogéologique des discontinuités, des sondages électriques ont été implantés à l'aplomb des anomalies, au niveau des stations $x=20$ m, $x=100$ m et $x=130$ m du profil (Fig. 8).

La figure 9 regroupe l'inversion des trois sondages réalisés sur le site de Kassembélé. Trois couches géo-électriques sont mises en évidence par les différents sondages :

- un terrain superficiel correspondant à de la latérite contenant des teneurs en sables et argiles variables (334-7204 Ω .m). Les variations de teneurs sont bien développées sur SE2;
- un terrain conducteur (14,6-272 Ω .m) correspondant à une formation de type altération argileuse dont l'épaisseur varie de 6 à 25 m ;
- un terrain très résistant (26650-46083 Ω .m) correspondant au socle granitique sain relativement fissuré.

On note la présence, sur SE3 d'un terrain (96 Ω .m, 12 m d'épaisseur environ) entre l'altération et le socle sain correspondant au socle fissuré altéré. Cette hypothèse est confirmée par le forage réalisé en SE3. L'interprétation des sondages électriques montrent que la cote du toit du substratum est constante (environ 10 m). Le forage réalisé au niveau de SE3 a fourni un débit de 5 m³/h et a mis en évidence une épaisseur d'altération de 9 m. Le sondage SE3 a permis une bonne estimation de l'épaisseur d'altérites, cependant la limite horizon fissuré et socle sain n'est pas évaluée avec précision.

La mise en œuvre de cette méthode a permis l'implantation de 9 forages dont 4 sont positifs soit un pourcentage de succès de 44,44 % (Tab. 1).

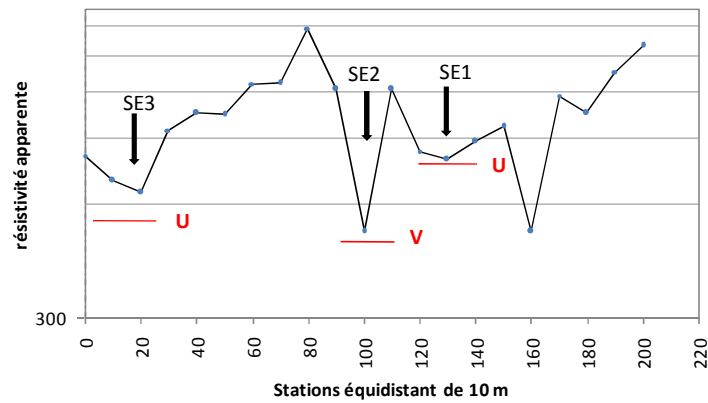


Fig. 8. Profil de traîné électrique de Kassembélé.

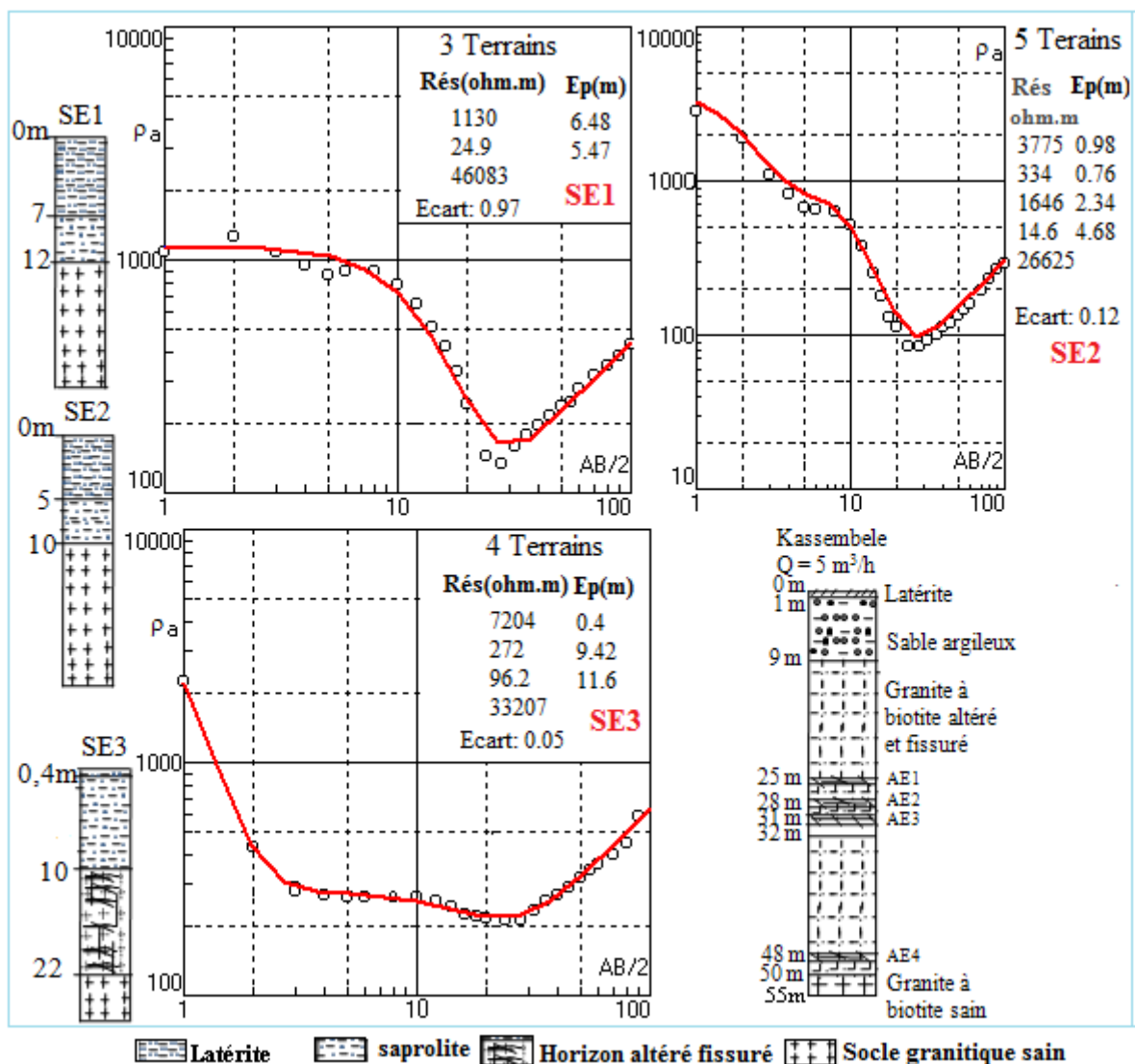


Fig. 9. Interprétation géologique des sondages électriques et coupe lithologique à Kassembélé

Tableau 1. Résultats de la première phase de prospection

Localité	Altitude	Lithologie selon carte géologique	1 ^{ère} AE/ fracture	Q (m3/h)	Ep altérite (m)
Niéméné 1	376	Leucogranite peraluminuex	53	0	29
Niéméné 2	370	Leucogranite peraluminuex	82	0	4,13
Niéméné 3	380	Leucogranite peraluminuex	48,5	0	23,9
Tindikan sofana	376	Leucogranite peraluminuex	44	1	31
Kassemblé	370	Granite à biotite homogène	25	5	9
Kafigué 2	260	Granite à biotite homogène		0	9,32
Karpélé sokoro 1	344	Leucogranite peraluminuex		0	15
Kafiné noumoussou		Migmatite granitique	52	0,5	32
Koffissikaha	216	Granodiorite	17	4,2	13

4.5.2 RESULTATS DE LA METHODE TELEDTECTION ET GEOPHYSIQUE

Cette méthode a été mise en œuvre dans 15 localités du département de Dabakala. Les études préliminaires ont permis d'avoir une carte linéamentaire de la localité de Bokala Napiandougou (Fig. 10). Les linéaments sont orientés préférentiellement selon deux directions : N20-30° et N100-120°.

Le profil du traîné électrique présente une courbe irrégulière et montre des pics où la chute de résistivité est importante attestant de la présence d'un corps conducteur qui peut être interprété comme un aquifère (Fig. 11). Le linéament 13°N est aussi souligné par un pic de type "U". Sur la courbe, les pics correspondent à deux types d'anomalies. Une anomalie de type " U " (x = 30 m) et de type " H " (x ∈ [100; 110] et x ∈ [140; 150]).

Pour vérifier la succession verticale de terrain et connaître l'intérêt hydrogéologique des discontinuités, des sondages électriques ont été implantés à l'aplomb de ces anomalies, au niveau des points x= 30 m et x=110 m du profil (Fig. 12).

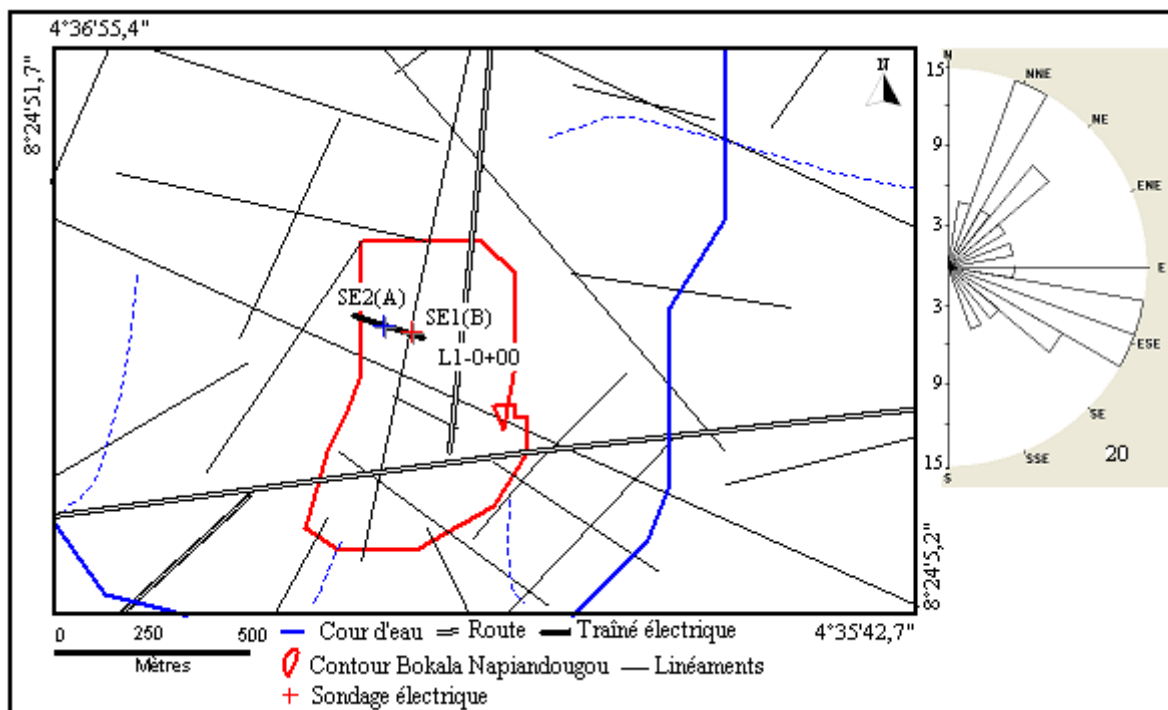


Fig. 10. Carte linéamentaire de la localité de Bokala-Napiandougou

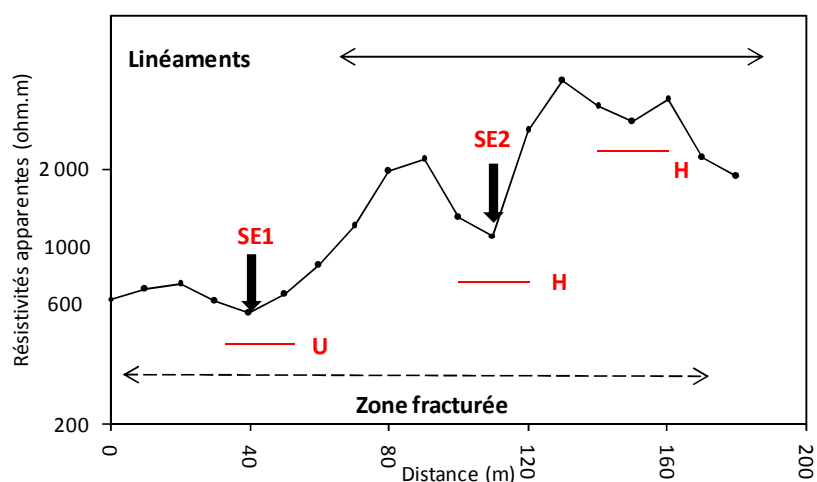


Fig. 11. Signatures du linéament N13° de Bokala-Napiondougou par le traîné

La figure 12 regroupe l'inversion des deux sondages réalisés sur le site de Bokala Napiondougou. Trois couches géoélectriques sont mises en évidence par les différents sondages :

- un terrain superficiel correspondant à l'argile latéritique (107-117 Ω .m) dont l'épaisseur varie de 0,5 à 1m ;
- un terrain conducteur (20-122 Ω .m) correspondant à l'horizon argilo-sableux dont l'épaisseur varie de 6 à 25 m ;
- un terrain très résistant (13695-36433 Ω .m) correspondant au socle granitique sain relativement fissuré.

On note la présence, sur SE2 d'un terrain intermédiaire (9190 Ω .m, 29 m d'épaisseur environ) entre les argiles sableuses et le socle sain correspondant au socle fissuré. Cette interprétation est confirmée par le forage réalisé au niveau de SE2.

L'interprétation des sondages électriques montrent donc une variabilité de la côte du toit du substratum qui passe de 25,7 m sur SE2 à 8 m sur SE1. Le forage réalisé au niveau de SE2 a permis d'obtenir un débit de 1 m³/h. L'épaisseur d'altération sur ce forage est de 23 m. Il existe donc une bonne corrélation entre le sondage SE2 et le forage.

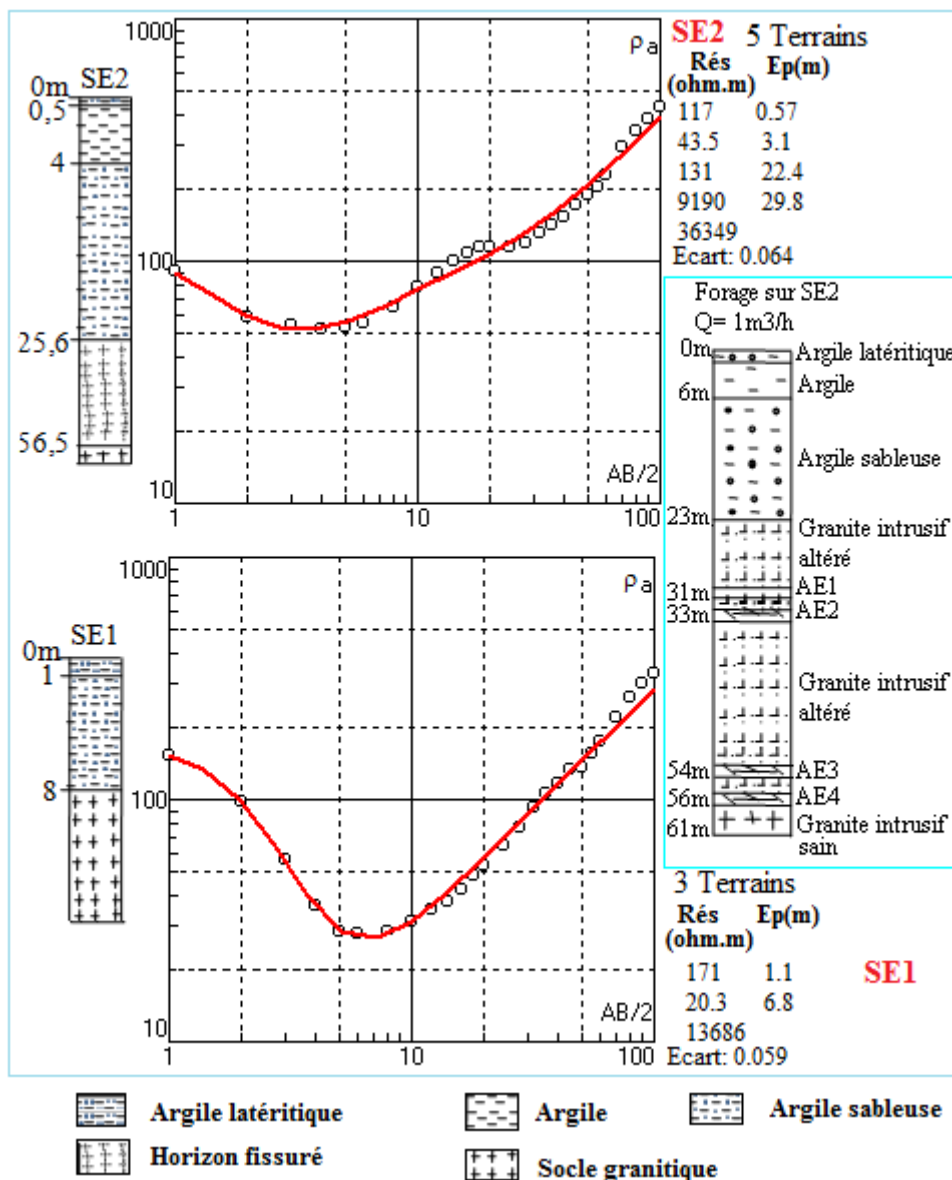


Fig. 12. Interprétation géologique des sondages électriques et coupe lithologique de Bokala-Napiondougo

Cette approche a permis l'implantation de 17 sondages mécaniques dont 12 positifs soit un pourcentage de succès de 70,59 % (Tab. 2). Il y a une nette amélioration du taux de réussite des forages. Sur l'ensemble des 26 forages réalisés dans le département de Dabakala, 16 sont déclarés positifs et 10 négatifs, soit un taux de succès de 61,53 %.

Tableau 2. Résultat de la deuxième phase de prospection

Localité	Altitude	Lithologie selon carte géologique	1 ^{ère} AE/ fracture	Q (m3/h)	Ep altérite
Tetindougou	267	Granite à biotite homogène	23,5	1,5	20
Diedana 1	242	Granite à biotite homogène		0	4
Diedana 2	238	Granite à biotite homogène		0	4
Bokala	352	leucogranite peralumineux	31	1	23
Niéméné	376	leucogranite peralumineux	75	3,6	29
Karpélé sokoro 2	341	leucogranite peralumineux		0	4
Yaossedougou	297	Granite porphyrique	48	1	40
Karpélé	315	Granodiorite	35	1	33
Finessedougou	291	Granodiorite	22,5	0,5	9
Kawolo sobara	318	Granodiorite	63	2,5	38
Lissolo sobara	181	Métasédiment, métavulcanites	53	3	43
Namahounoudougou	255	Métasédiment, métavulcanites	50	6	42
Kogbéra	287	Métasédiment, métavulcanites	27	3	24
Kafondougou 1	291	Migmatite granitique		0	21
Kafondougou 2	280	Migmatite granitique	35	0	28
Diarradougou	268	Migmatite post-birrimiennes	60	2,5	11
Darala	266	Migmatite post-birrimiennes	59	1,5	33

Du point de vue lithologique, il apparait que les granites et principalement les leucogranites peralumineux présentent un taux élevé d'échec, du fait du remplissage ou colmatage de la fissuration. Ce taux d'échec particulièrement élevé dans la sous-préfecture de BoniéréDougou a affecté le taux de succès global de l'ensemble de la zone d'étude (Fig. 13). L'épaisseur moyenne des altérites est de 22 m. Les plus grandes et les plus faibles sont enregistrées respectivement dans les sous-préfectures de Bassawa (42 m à Namahounoudougou) et de Fombolo (4 m à KarpéléSokoro). Les débits importants se rencontrent sur des épaisseurs d'altération allant de 40 à 50 m, surtout sur substratum schisteux.

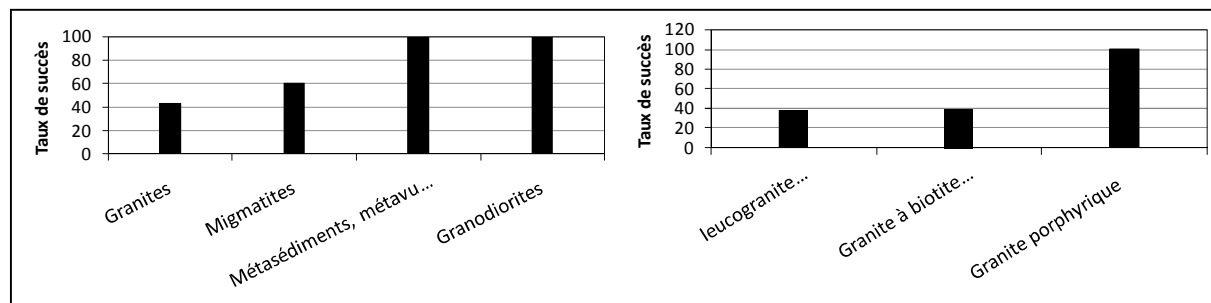


Fig. 13 Taux de succès en fonction des formations géologiques.

L'étude de l'influence de la proximité des forages avec la fracturation montre que les forages implantés au voisinage de plusieurs fractures présentent un taux de succès plus élevé (87,5%) que les autres (Fig. 14). Les forages implantés à partir des anomalies géophysiques ont prouvés l'utilité de la méthode dans la mesure où des résultats importants ont pu être obtenus. Lorsque les anomalies géophysiques mises en évidence sont d'origine tectonique, elles peuvent être potentiellement très productives (Tab. 3).

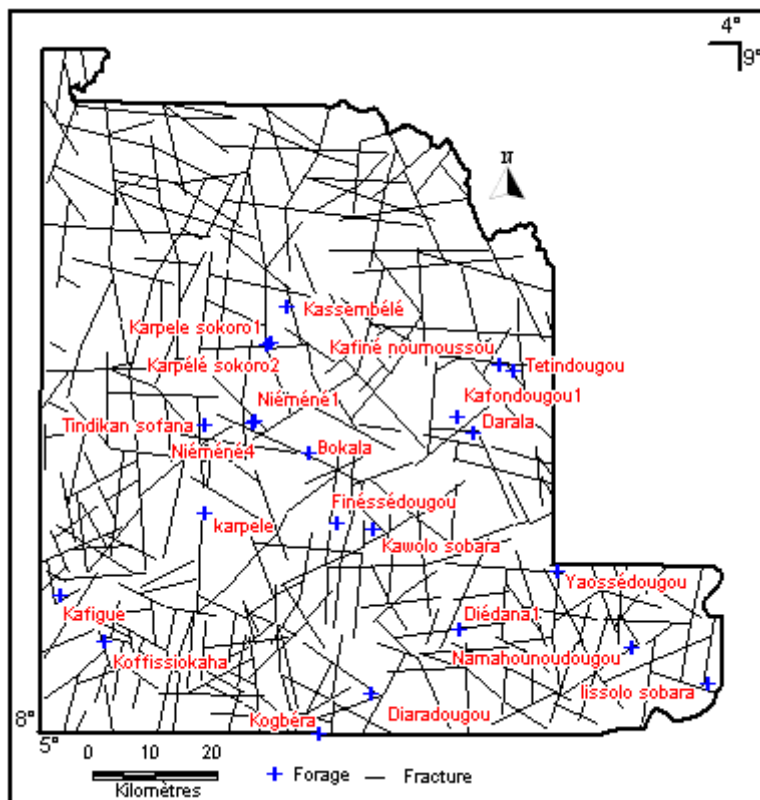


Fig. 14 Positionnement des forages sur le schéma structural

Tableau 3. Taux de succès en fonction du positionnement des forages

Type de forage	Effectif	Forages positifs	Forages négatifs	Taux de succès (%)	Débits moyens (m ³ /h)
Forages implantés sur une fracture	7	3	4	42,85	1,15
Forages implantés sur plusieurs fractures	8	7	1	87,5	2,67
Forages implantés hors fracture (anomalies géophysiques)	11	6	5	54,54	2,6

5 DISCUSSION

Le schéma structural du département de Dabakala est le résultat de l'interprétation de carte aéromagnétique et d'images satellitaires. Ces structures géologiques donnent un aperçu de la fracturation du milieu souterrain. Il est possible que certaines d'entre elles, identifiées dans les études antérieures [19], [29], [8]) ne soient pas identifiées ici. Cela pourrait être attribué à la compétence de l'opérateur selon [25]; [17]. L'architecture du réseau de fractures est fortement tributaire du support d'étude et de l'expérience de l'opérateur. Il peut se poser aussi le problème de l'échelle à laquelle ces linéaments sont observés; ceci entraîne souvent une mauvaise interprétation des images. Malgré ces limites, des études antérieures ont montrées l'utilité de telles cartes pour la prospection hydrogéologique [22], [24]. La méthode géomorphologie et géophysique a permis d'avoir un taux de succès moyen imputable à l'existence de fractures stériles ou colmatées. Le couplage des données de télédétection et de géophysique (traîné et sondage électrique) a permis d'améliorer le taux de succès des forages sans pour autant perdre de vue les risques d'échec car la répartition des ressources sont aléatoires dans certains contextes géologiques [21]. En plus, l'obligation d'implanter des points d'eau à proximité immédiate des villages, en marge des zones favorables, introduit parfois une incertitude que l'on est tenté de lever. Ce qui confère à la géophysique une importance primordiale. Le taux de succès cache quelque fois des disparités locales dues à certains paramètres comme la lithologie et la fracturation. La prospection par traîné et sondage électrique montre que le sous-sol étudiés est constitué de nombreuses structures assimilables à la fracturation. Toutefois les sondages électriques ne sont pas bien adaptés pour étudier certaines structures et il faut considérer les interprétations proposées dans ce cas comme des hypothèses de travail

[31]. Le profil de traîné électrique peut être trop réduit pour identifier correctement les structures et trop peu pénétrant pour les caractériser [2]. De plus, dans les conditions géologiques (matériaux d'altération argilo-sableux notamment) comme c'est le cas ici, la résistivité électrique n'est pas un indicateur univoque de la ressource en eaux souterraines. En effet, les variations de résistivité peuvent être interprétées comme des variations de la teneur en eau mais aussi de la teneur en argiles des horizons du sous-sol [17], [31]).

6 CONCLUSION

Au terme de cette étude nous retenons que le schéma structural combiné a mis en évidence de nombreuses structures orientées suivant une direction méridionale régionale NS (N170-180 et N00-10°), des structures de direction N20-30° associé à des zones de contact, des décrochements N80-90° et enfin des fractures profondes N110-130°. L'investigation géophysique a permis d'identifier des structures et à définir les caractéristiques des aquifères (épaisseurs d'altération, profondeur de l'horizon fissuré). Dans ce département, malgré les quelques échecs rencontrés, la méthodologie adoptée a permis de fournir de l'eau pour l'approvisionnement de 16 localités.

Nous comptons approfondir les études géophysiques et étendre les différentes méthodes sur l'ensemble de la zone d'étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier et témoigner leur reconnaissance aux instructeurs anonymes pour leurs critiques, commentaires et suggestions qui ont contribué à l'amélioration du présent document. Les auteurs voudraient aussi remercier les responsables de la Direction de l'Hydraulique Humaine (Côte d'Ivoire) qui ont mis à leur disposition certaines données utilisées dans le cadre de cette étude.

REFERENCES

- [1] D. Baka, "Géométrie, hydrodynamisme et modélisation des réservoirs fracturés du socle protérozoïque de la région d'Oumé (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire)," Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 283 p, 2012
- [2] J-M. Baltassat, "Prospections hydrogéologiques sur le bourg de cacao (Guyane). Mesure d'émanométrie radon et sondages électriques", *Rapport BRGM*. RP-53448-FR, 49 p, 2004
- [3] J. Biémi, I. Doumouya, N. Soro, J.P. Jourda, H. Gywn, and S. Deslandes "Influence des fractures sur la productivité des forages dans le bassin versant de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : apports de la télédétection et d'un système a référence spatiale", *Annales Université d'Abidjan, Série c (sciences et techniques)*, Vol. b, Sciences Naturelles et Biologiques, tome XXVI-b, 1995
- [4] Dégallier, *Géophysique et hydrogéologie*. Chron. Hydrogéol., Fr., n°.2, pp. 6-23, 1963
- [5] O. Z. De Lasmé, "Contribution à une meilleure connaissance des aquifères fissurés du socle précambrien : cas de la région de San-Pedro (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire)", Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, 211 p, 2013
- [6] C. Delor, I. Diaby, J.P. Tastet, B. Yao Y. Siméon, M. Vidal and A. Dommangnet, "Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte-d'Ivoire à 1/200 000, feuille Abidjan", *Mémoire de la Direction de la Géologie de Côte-d'Ivoire*, n°3, Abidjan, Côte- d'Ivoire, 26 p, 1992.
- [7] S. Doumbia, A. Pouclet, A. N. Kouamelan, J. J. Peucat , M. Vidal and C. Delor, "Petrogenesis of juvenile-type Birimian (Paleoproterozoic) granitoids in Central Côte-d'Ivoire (West Africa): geochemistry and geochronology", *Precambrian Res.* 87, pp.33-37, 1998
- [8] D. Gasquet, P. Barbey, M. Adoua and J. L. Paquet, "Structure, Sr–Nd isotope geochemistry and zircon U–Pb geochronology of the granitoids of the Dabakala area (Côte d'Ivoire): evidence for a 2.3 Ga crustal growth event in the Palaeoproterozoic of West Africa", *Precambrian Res.*127, pp.329-354, 2003
- [9] B. Giroux and M. Chouteau, *Notes de cours – Magnétisme*. Ecole polytechnique.Montréal, 105 p, 2007
- [10] J. P. Jourda, "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'Hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire", Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429 p, 2005.
- [11] J. P. Jourda, M. B. Saley, E. V. Djagoua, K. Kouamé, J. Biémi and M. Razack, "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", *Télétection*, 5 (4) : pp.339-357, 2006
- [12] M. Koita, "Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire)", Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 220 p, 2010
- [13] E. Kouadio, I. Savané, T. Lasm and J. Biémi, "Hydrogeology Prospecting in Crystalline and Metamorphic Area by Spatial Analysis of Productivity Potential", *European Journal of Scientific Research*, 22(3): pp.373-390, 2008
- [14] K. F. Kouamé, T. Lasm, J. R. De Dreuzy, G. A. Akaffou, O. Bour and P. Davy, "Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)", *Revue des Sciences de l'Eau*, 23 (1) : pp.41-56, 2010
- [15] A. Kouassi, "Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie- débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire", Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, 183 p, 2007
- [16] Y. Koussoubé, A. Savadogo and S. Nakolendousse, "Les différentes signatures de fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (Bassin versant de Bidi, province de yatenga)", *Télétection*, 3 (5) :pp.419-427, 2003
- [17] T. Lasm, "Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 274 p, 2000
- [18] T. Lasm, F. Kouamé, N. Soro, J. P. Jourda and J. Biémi, "Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie* 5 : pp.135-154, 2004
- [19] S. Lemoine, "Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso : Similitudes et différences ; les linéaments de Greenville-Ferkessédougou et Grand Cess-Niakaramandougou", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 334 p, 1988
- [20] A. Pouclet, M. Vidal, C. Delor, Y. Siméon and G. Alric, "Le volcanisme birimien du nord-est de la Côte-d'Ivoire, mise en évidence de deux phases volcano-tectoniques distinctes dans l'évolution géodynamique du Paléoproterozoïque", *Bulletin Société Géologique France*, 167 p, 1996
- [21] J. C. Marechal, "Faisabilité d'une exploitation des ressources en eau profonde du socle granitique de la montagne Bourbonnaise pour l'alimentation en eau potable", *Rapport BRGM RP. 53122. FR*, 39 p, 2004
- [22] B. Mougin, A. Carn, E. Thomas and JP. Jegou, "Silures Bretagne" *Rapport BRGM/RP 5-1481-RP*. 53 p, 2002
- [23] K.H. Niamke, M.B. Saley, B.E. N'dri, A. Ouattara, J. Biémi, "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*, Vol.24, N°1, pp.74-93, 2008.
- [24] V. Rabemanana, "Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de l'Androy (Sud de Madagascar)", Thèse de doctorat, Université de Paris V1, 171 p, 2002
- [25] M. Razack, "Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie", PhD Thèse de doctorat, Université de Languedoc, 384 p, 1984
- [26] F. Rey, "Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais. Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, p 178 p, 2007
- [27] A. N. Savadogo, "Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude régionale du Bassin versant de la Sissil", Thèses de doctorat, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350 p, 1984.
- [28] I. Savané, B. Goze and J. Biémi, "Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (Bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire)", *Télétection et Gestion des ressources en Eau*, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.
- [29] B. Tagini, "Esquisse structural de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale", Thèse de doctorat, Université de Lausanne (Suisse), 302 p, 1971
- [30] E. Thomas, B. Mouguin, N. Debeglia and J. Perin, "Apport des levés géophysiques aéroporté à la recherche et la protection des ressource en eau : application à la région du Léon (Finistère)", *Mémoire BRGM/RP-51740-FR*, 53 p, 2002
- [31] Ph. Weng, P. Laporte, B. Joseph, N. Courtois, P. Lachassagne and J. M. Baltassat, "Prospectons hydrogéologiques sur le bourg du cacao (Guyane). Mesures d'émanométries radon et sondages électriques", *Rapport BRGM/RP-53448 FR*, 49p, 2004.

- [32] K. T. Yao, "Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du Département de Soubré. Apports de la télédétection, de la Géomorphologie et de l'hydrogéochimie", Thèse de doctorat, Université de Cocody, 284 p, 2009
- [33] K. T. Yao, F. Grogbla, M. S. Oga and T. Assoma, Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Télédétection*, 10(4) : pp.161-178, 2012
- [34] M. Youan Ta, T. Lasm, J. P. Jourda, K. F. Kouamé and M. Razack, "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*, 8(2) : pp.119-135, 2008.