

Optimisation de la reconnaissance hydrogéologique par modélisation géophysique 2D, cas de la zone intermédiaire Ankaraobato-Dorodosy Rakoto

Rakoto H.^{1,2,*} Rajaomahefasoa R.¹, Rasolomanana E. H.^{1,3}

¹ : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

² : Mention Physique et Application, Université d'Antananarivo,

³ : Mention Ingénierie Minière, ESPA, Université d'Antananarivo

*Auteur correspondant : Rakoto Heritiana, Tel. +261341428689, E-mail : rakotoheritina@moov.mg

Résumé- La reconnaissance hydrogéologique fait appel à des études multidisciplinaires. On propose dans le cadre de cette recherche une combinaison photo-interprétation, géologie, modélisation hydrogéologique et imagerie géophysique 3D qui donne accès à une meilleure compréhension de la structure des aquifères et les formations imperméables présents dans le sous-sol. La coupe de forage est une information utile à l'interprétation des coupes géoélectriques et d'étalonner dans de meilleures conditions la géophysique et l'hydrogéologie.

Un cas d'étude complexe, que cette zone intermédiaire entre Ankaraobato et Dorodosy, où on rencontre trois types d'aquifère : les dépôts alluvionnaires à nappe libre, les nappes d'arène semi-captive et la nappe de fracturation et/ou fissuration de roches, est traité en guise d'application de l'approche proposée. Le résultat obtenu est intégré au contexte hydrogéologique caractérisant, par-là, la structure de l'aquifère, l'écoulement et les zones de confluence des eaux souterraines.

Mots-clés- Hydrogéologie, Géophysique, Photo-interprétation, Modèle 2D de sous-sol,

Introduction

La caractérisation d'un aquifère nécessite la bonne connaissance de la structure et des formations géologiques associées du sous-sol (*Kouassi et al. 2014, J.J. Collin 2004, Castany, 1982*). On doit dans ce cas débiter par l'observation de surface, et selon le moyen disponible, on peut continuer par la prospection du sous-sol.

L'observation de surface est souvent limitée, surtout quand la couverture est importante, cas des dépôts alluvionnaires et sédimentaires où la morphologie est plane. On ne peut pas suivre, dans un tel cas, les variations locales de la structure du sous-sol, alors que celles-ci guident pendant la caractérisation de certaines zones particulières, entre autres l'aquifère.

La compilation de toutes les données, l'observation de surface, la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie, affinée aux imageries géophysiques servent de base à l'étude de la structure du sous-sol. La présentation en 3D aide à la modélisation du système aquifère.

Une zone constituée d'un système multi-aquifères, située sur les Hauts Plateaux de Madagascar est prise comme cas d'étude. Le sous-sol y est subdivisé en trois niveaux géologiques : alluvionnaires, latéritiques et rocheux (*B. Dussarat et al. 1993*). Chaque système a son type d'aquifère. Ceux des deux premiers sont de type poreux et celui du substratum est localisé dans les discontinuités du socle rocheux matérialisées par des fractures et/ou des fissures.

Méthodologie

Démarche du traitement

La démarche indiquée, ci-après, diffère de la procédure classique de modélisation du sous-sol du fait qu'elle introduit l'imagerie géophysique 3D dans la modélisation hydrogéologique. L'Imagerie par Tomographie Electrique (ITE) est souvent utilisée dans la reconnaissance géoélectrique du sous-sol (*Dahlin 1996, Loke 2010a*). On utilise dans ce cas la technique de

mesure par panneaux électriques. Les données ainsi obtenues seront ensuite inversées en suivant l'algorithme de calcul de *M H Loke et al.* (2003).

L'identification du modèle géoélectrique, en comparant avec la coupe de structure du sous-sol sur un forage défini au préalable, informe sur la correspondance entre les paramètres géoélectrique et la structure hydrogéologique. La combinaison des modèles géoélectriques 2D des panneaux amène ensuite au modèle 3D du sous-sol.

Le logigramme, ci-après, donne la démarche suivie lors de la caractérisation des aquifères présents dans la zone d'étude.

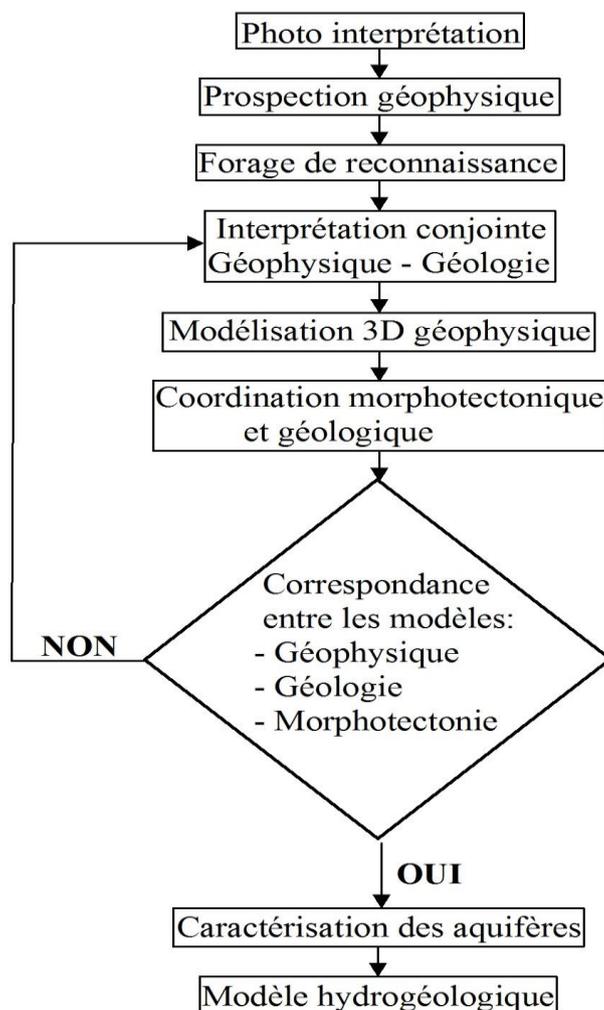


Figure 1 - Logigramme du traitement

Base méthodologique de la géophysique

La méthode électrique est basée sur l'utilisation de la loi d'Ohm. Pour un dispositif connu on peut calculer la résistivité électrique d'un milieu du sous-sol.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \qquad \rho = \frac{2\pi \cdot r \cdot V}{I}$$

R: Résistance en Ω - ΔV différence de potentiel entre deux points de mesure en V - I Intensité de courant en mA - r distance entre le corps et le point de mesure en m ; ρ résistivité électrique en $\Omega \cdot m$

La résistivité électrique permet de délimiter les différentes structures situées dans le sous-sol et d'en déduire la possible présence et la qualité de l'eau souterraine. Les mesures de résistivité des terrains sont effectuées à l'aide d'un résistivimètre.

Les valeurs obtenues sur le terrain sont les résistivités apparentes. A partir de ces valeurs, on cherche à retrouver les épaisseurs et les résistivités vraies des différents corps responsables des résistivités mesurées en surface. Pour ce faire, on utilise le programme d'inversion de *Loke* (2003). Par une méthode itérative, *Loke & Barker* (1996a), on obtient un modèle de résistivité vraie correspondant à un modèle de résistivité apparente calculée approchant le plus les valeurs de résistivité apparentes mesurées. Une fois le modèle inversé, on définit la valeur de résistivité électrique de chaque formation et on trace la surface de chaque horizon en utilisant le maillage par krigeage.

Présentation de la zone d'étude

Localisation de la zone

La zone est localisée géographiquement, selon le système de coordonnées **WGS 84 UTM/UPS 38K**, zone Sud, aux environs des points $X=768\ 167\ m$ et $Y=7\ 900\ 571\ m$.

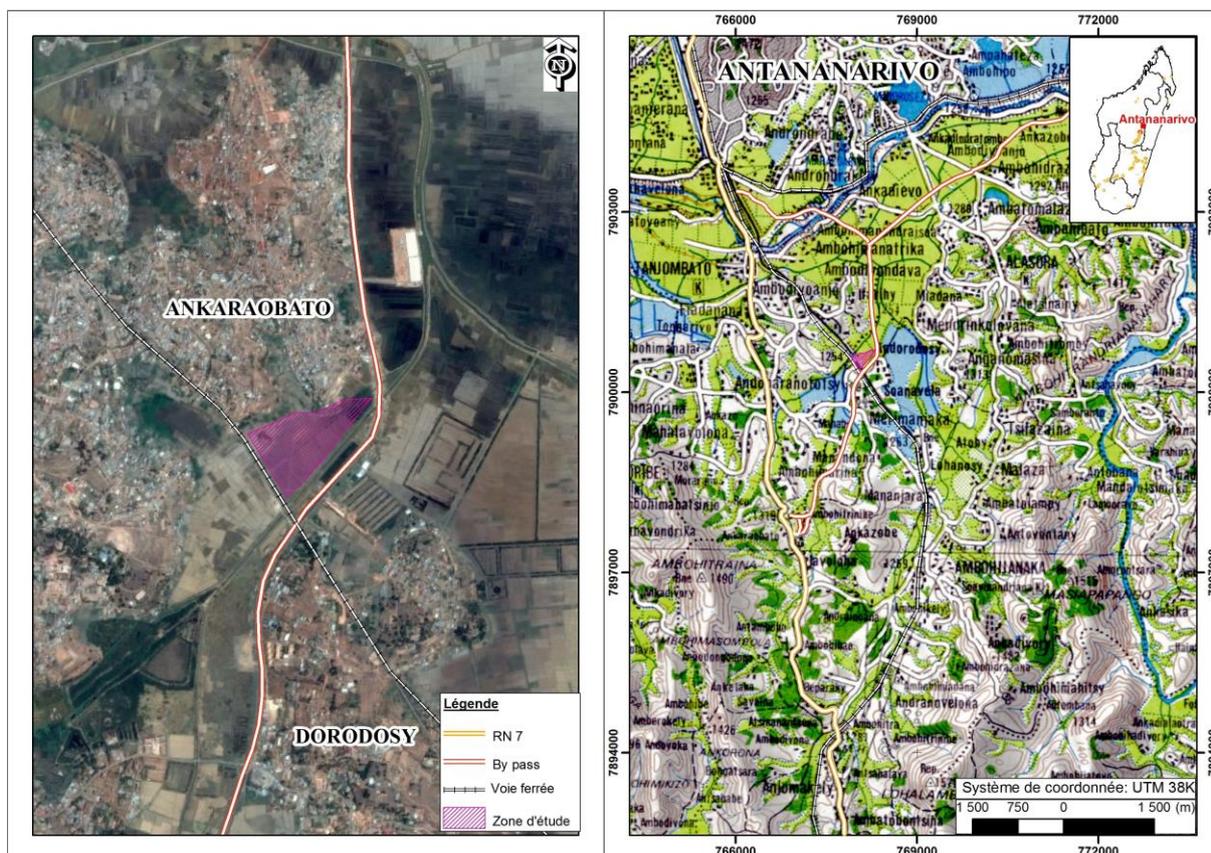


Figure 2 - Localisation de la zone

Elle est formée morphologiquement de plaine alluviale. Elle fait partie des Hauts Plateaux de Madagascar. Elle se trouve dans la zone dite : « amont de la plaine de Betsimitatatra » et située au Sud de l'agglomération de la ville d'Antananarivo. Le site coupe le prolongement Nord-Sud de la crête des collines d'Ankaraobato et de Dorodosy et se prolonge globalement dans la direction Sud-Ouest/Nord-Est.

Climat

La zone est sous climat humide et frais des Hauts Plateaux de Madagascar. La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 1300mm. L'évapotranspiration moyenne annuelle de la

région est de 726 mm (*Chaperon et al. 1993*). La période de pluie dure généralement cinq mois, d'Octobre à Avril. La hauteur maximale de pluie mensuelle est rencontrée pendant le mois de Janvier.

Le régime subit une forte irrégularité au niveau de la précipitation. Des alternances d'insuffisance d'eau et d'inondation sont observées, pendant la saison de pluie (*Chaperon et al. 1993*). Le bilan hydrologique général de la zone est alors contrôlé par le régime de la rivière Ikopa qui draine l'eau souterraine pendant la saison sèche, mois d'octobre, et inversement, alimente le système aquifère pendant la période de pluie, mois de Janvier (*Grillot et al., 1989*)

Cadre géologique

Sur le plan géomorphologie et structure géologique, l'observation et l'interprétation de la photographie aérienne font ressortir les formations suivantes:

- la ligne de crête des chaînes des collines suit globalement la direction nord sud, les bas-fonds inter collinaire sont orientés principalement suivant cette direction ;
- les linéaments à l'Ouest et au Nord immédiat du secteur d'étude suivent la direction globalement N150 ;
- sur le reste de la zone dans le champ de la photographie, la direction varie entre NS et N110 s dont la valeur est comprise entre N10 et N60 ;

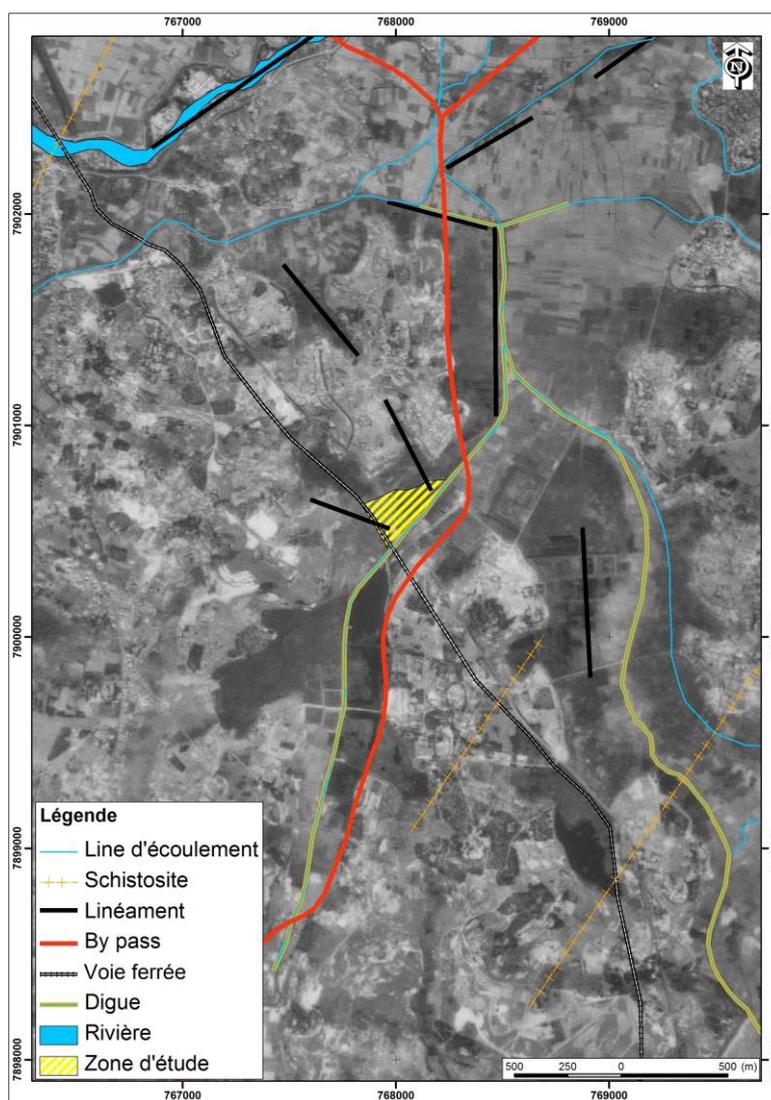


Figure 3 – Orthophoto montrant les traits structuraux majeurs

L'organisation du paysage repose sur la nature des terrains rencontrés regroupés par unité géomorphologique : interfluves (où la couverture latéritique domine), bas-fonds, plaines alluviales.

Géologie régionale

➤ Socle cristallophyllien

Le socle est formé par un complexe cristallophyllien. Les roches qui constituent le socle de la zone d'étude ont été regroupées en deux ensembles sur la base de critères lithologiques, structuraux et de sensibilité à l'altération : les gneiss et les migmatites.

Le plus souvent, ce socle ancien n'est pas affleurant, y compris au droit des interfluves où il est présent sous un recouvrement latéritique qui peut atteindre une cinquantaine de mètres. La succession des faciès d'altération varie comme suit, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base (*Laplaine, 1953*) :

- un horizon ferrallitique rouge de quelques mètres ;
- des altérites (horizon altéritique kaolinique) qui correspondent à la zone d'argilisation des matériaux altérés ;
- des arènes micacées, un matériau arénitique argilo-sableux ;
- le socle sain lui-même.

➤ Plaine alluviale

La plaine alluviale est le résultat du remplissage d'un compartiment effondré du socle. Au Quaternaire, les alluvions apportées par le réseau hydrographique ancien ont peu à peu comblé ce bassin (*F. Bourgeat, 1968, Randrianarivo, 2012*).

Les sédiments dans la plaine du Betsimitatatra sont peu épais et s'amincissent de l'amont vers l'aval du fait de la pente du socle sous-jacent. Ils ne dépassent jamais une trentaine de mètres d'épaisseur dans la partie Sud de la plaine, ne sont plus épais que de 8 m au confluent de l'Ikopa et du Sisaony et disparaissent à l'aval, au niveau du seuil de Bevomanga.

La succession des faciès alluvionnaires varie comme suit, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base :

- une formation limono-argileuse superficielle peu épaisse, qui constitue le substratum des rizières ;
- des argiles jaunes ou grises, de 0,5 à 3,0 m d'épaisseur, plus ou moins mélangées à de la tourbe ;
- le plus souvent un niveau de tourbe franche, qui peut atteindre 1,5 m d'épaisseur
- un niveau d'argiles blanches, kaoliniques plus ou moins sableuses, qui peut atteindre 2 m d'épaisseur.
- des sables, qui peuvent atteindre 10m à 15 m d'épaisseur. Leur granulométrie s'accroît vers la base.

Ces alluvions reposent sur un matériau arénitique non remanié, issu de l'altération du socle sous-jacent. Le secteur d'étude étant situé sur la plaine alluviale du Sud-Est d'Antananarivo. La succession des faciès indiquée ci-dessus y est alors présente.

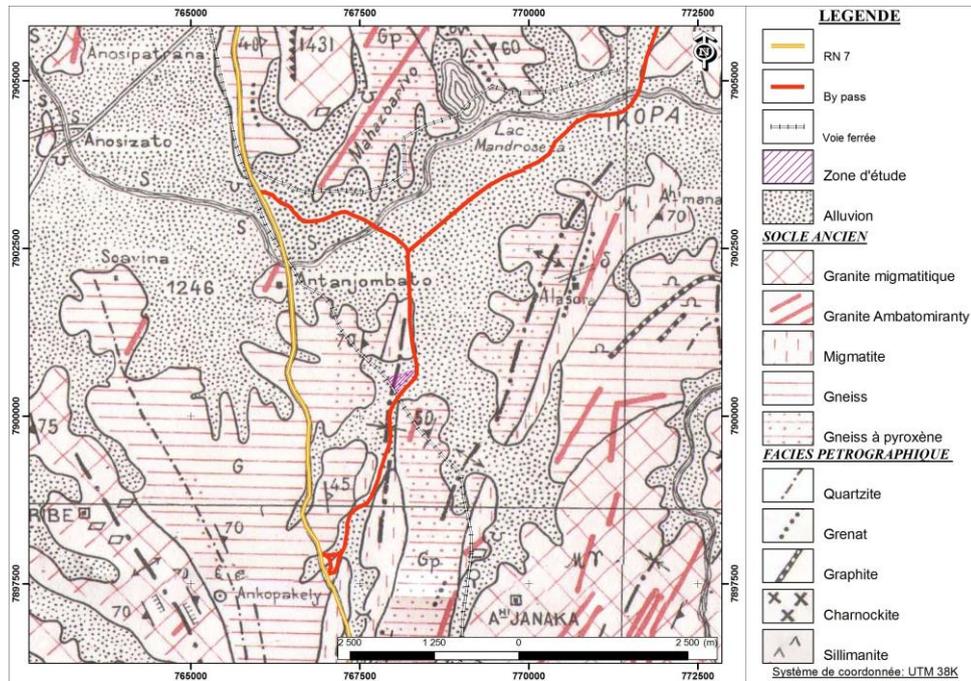


Figure 4 - Extrait de la carte de géologie régionale (Feuille P47)

Aperçu hydrogéologique

Le principal réservoir aquifère de la zone est constitué par les **sables alluvionnaires** qui se sont déposés dans la plaine alluviale. Il s'agit d'un sable siliceux parfois chargé en micas présent sur l'ensemble de la plaine.

Les **arènes** qui surmontent partout le socle sain, sont composées d'un matériau argilo-sableux riche en micas, feldspaths kaolinisés et ferromagnésiens. Il n'est pas rare que le toit de ce niveau soit argilifié. Ce niveau aquifère abrite une nappe captive au droit des bas-fonds et de la plaine alluviale, sous le remplissage quaternaire (Dussarat B. et al. 1993).

Dans le **socle métamorphique**, l'eau circule principalement au niveau des réseaux de fractures. Dans la zone d'étude, ce socle qui, sous les arènes forme la base de l'ensemble des formations affleurantes, constitue un aquifère discontinu, alimenté au travers des arènes sus-jacentes. Dans ces zones, la majeure partie du terme résiduel, c'est-à-dire non évapotranspirée, rejoint la nappe sous-jacente qui est également alimentée par le réseau hydrographique de surface.

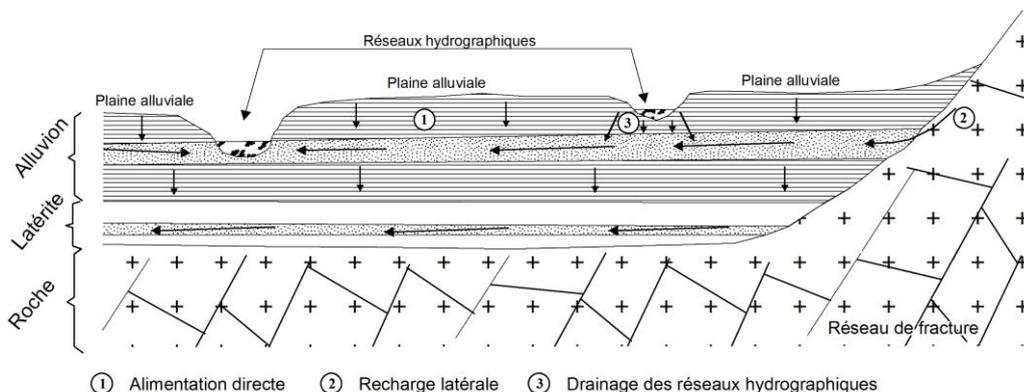


Figure 4- Modèle conceptuel des écoulements souterrains (Dussarat et al. 1992)

Au final, la nappe alluviale est alimentée par trois processus complémentaires : verticalement *per descendum* par les précipitations directes ; latéralement par les massifs du socle fracturé et altéré et verticalement *per descendum* par drainage du réseau hydrographique de surface (Grillot et al., 1990 - B. Dussarat, 1992 - Dussarat et al., 1993).

La nappe se vidange majoritairement dans le réseau des drains qui parcourent la plaine et peut joindre directement l'Ikopa via les multitudes de ruisseaux affluents.

Modélisation géophysique - Traitement et interprétation

Implantation des travaux géophysiques

Sept panneaux électriques utilisant les trois longueurs de lignes $a=5m$, $a=8m$ et $a=10m$ ont été implantés dans la zone. Les lignes suivent les directions globalement Est-Ouest et Nord-Sud coupant les deux directions de linéaments mises en évidence par la photo-interprétation.



Figure 5 - Implantation des travaux géophysiques

Comparaison des coupes lithologique et géoélectrique

Les deux panneaux P4 et P5 passent sur le point de forage F1. La séparation des trois unités géologiques, dépôts alluvionnaires, latérite et socle rocheux, est bien marquée par la présence d'un horizon à formation sableuse et d'une zone à roche altérée friable (Figure 6). Alors la variation de la structure géoélectrique est l'effet de ces changements de faciès.

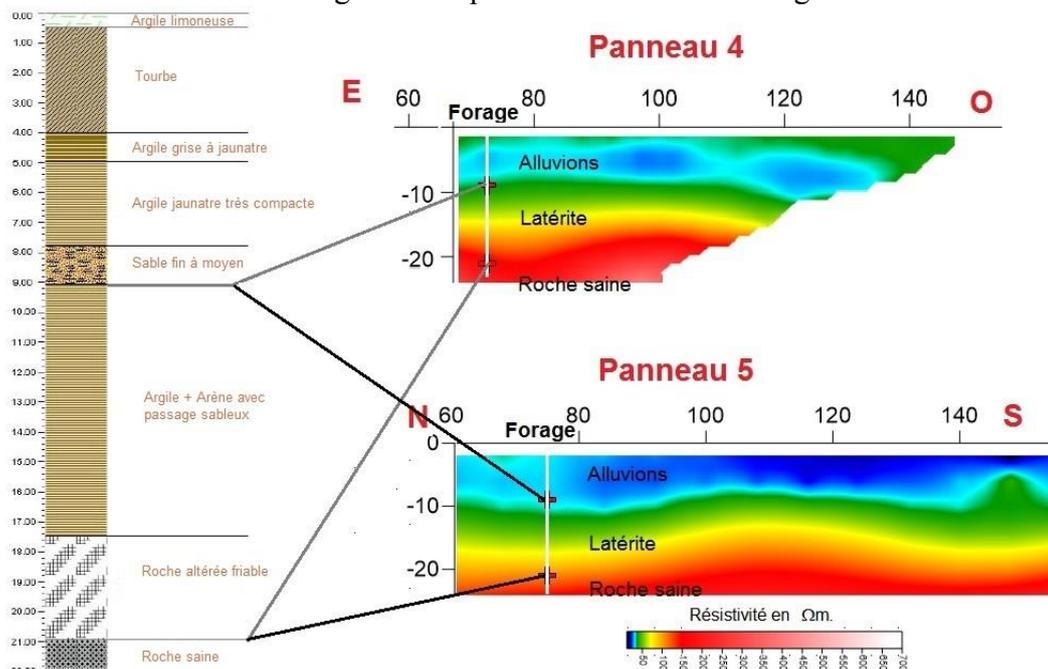


Figure 6 - Etalonnage log de forage - coupe géoélectrique

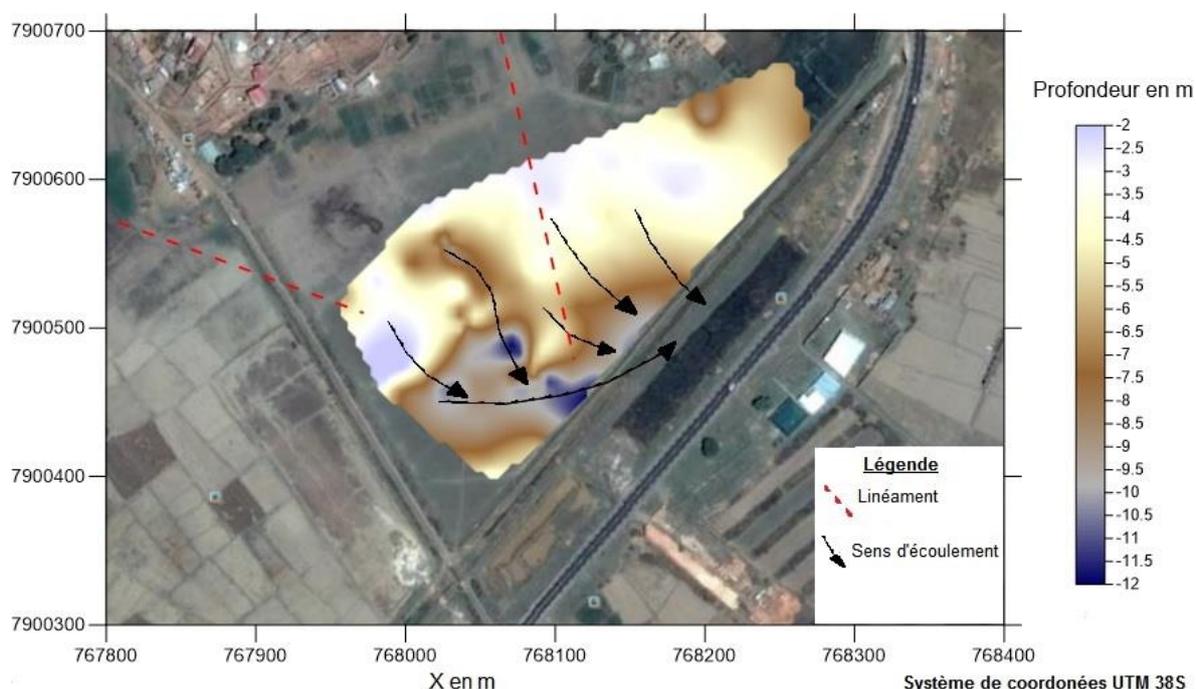
La comparaison permet de fixer les valeurs de résistivité électrique de chaque horizon et de suivre ensuite la variation spatiale de ceux-ci.

Modèle hydrogéologique des alluvions

La carte montre l'épaississement des alluvions qui se prolonge suivant la direction Est-Ouest dans le secteur Sud de la zone prospectée. En se basant sur la forme de la base des alluvions où le milieu poreux est constitué de sable développe, comme l'écoulement est contrôlé par la forme du toit de l'aquifère (Rakoto et al. 2003), l'eau souterraine qui est drainée vers le Sud jusqu'à la zone d'épaississement et qui suit peu après la direction Est au niveau de la zone épaisse (Figure 7).

La coupe lithologique traversée par le forage indique que l'aquifère du dépôt alluvionnaire est formé de sables surmontés par des tourbes et des sables argileux.

Comme l'alimentation se fait par percolation directe (Dussarat et al. 1982), la nappe d'eau souterraine y est libre et est en équilibre de charge avec l'atmosphère (Castany, 1982).



Hydrogéologie de la zone latéritique

L'aquifère des arènes se développe à l'intérieur de cette couche. Sa puissance est beaucoup importante dans la zone où la couche est épaisse. L'écoulement conditionne aussi de même la potentialité en eau souterraine de la zone, en termes de perméabilité hydraulique. Elle est beaucoup plus élevée dans la zone de confluence des écoulements.

La carte met en évidence trois épaisses zones A, B et C. Les deux premières zones se trouvent sur l'axe de passage des deux linéaments d'après la photo-interprétation. En se référant sur la morphologie générale du toit des roches imperméables sous-jacentes qui contrôle l'écoulement de la nappe des arènes (Courtois, 1999 – Rakoto et al. 2003), l'écoulement se fait du Nord vers le Sud au niveau de la zone d'étude. Il existe une direction locale d'écoulement due à la variation locale de la forme du substratum (Rakoto et al. 2003). Ce fait est visible aux alentours des lignes de dépressions qui se matérialisent en linéaments sur la photographie aérienne. La zone B a une potentialité plus élevée du point de vue quantitative et productivité.

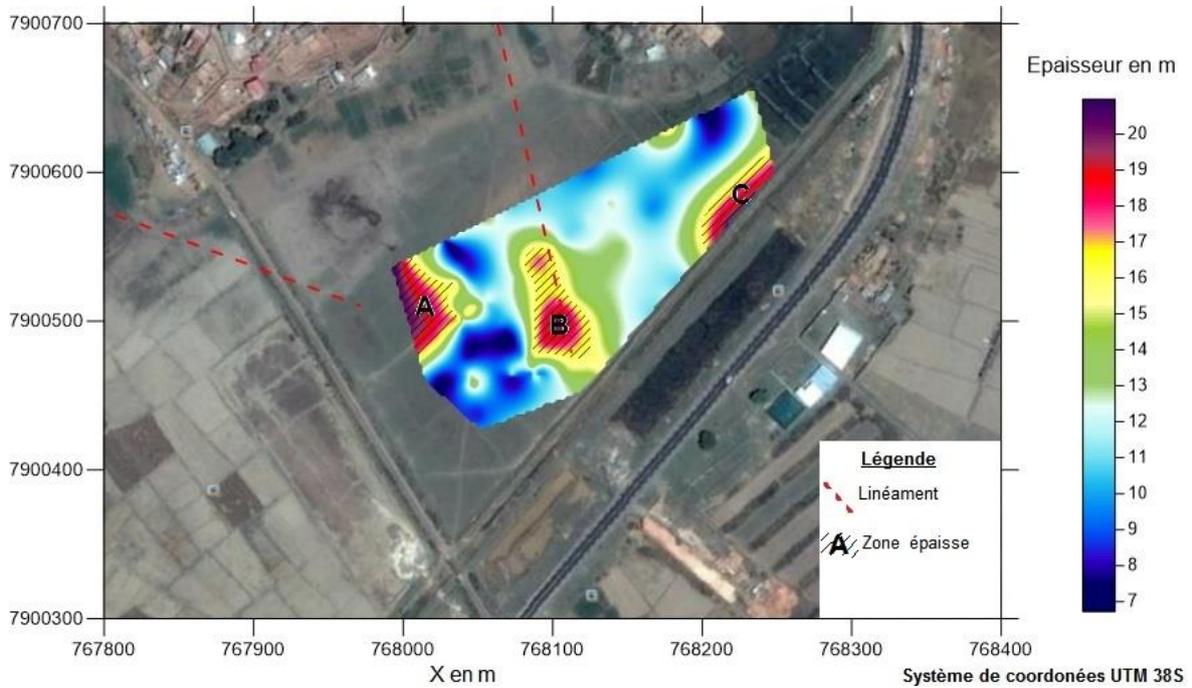


Figure 8 - Carte du niveau latéritique

Le toit du substratum rocheux

La forme du toit du substratum indique la présence d'une dépression alignée suivant l'axe de linéament mis en évidence par la photo-interprétation. Le socle cristallin est affecté par une déformation au niveau de cette discontinuité, soit d'origine tectonique soit due au changement minéralogique.

L'axe de discontinuité mis en évidence par la géophysique est le lieu privilégié de la circulation d'eau dans la zone à formation rocheuse (Castany, 1982 – Dussarat, 1992). Les eaux de fracturation du socle sont drainées par les réseaux d'eau de surface (Dussarat et al. 1993), la rivière Ikopa et ses affluents. L'écoulement de cette nappe semi-captive suit le régime de la nappe qui est en communication avec la rivière, de direction Sud-Est/Nord-Ouest dans la zone d'étude.

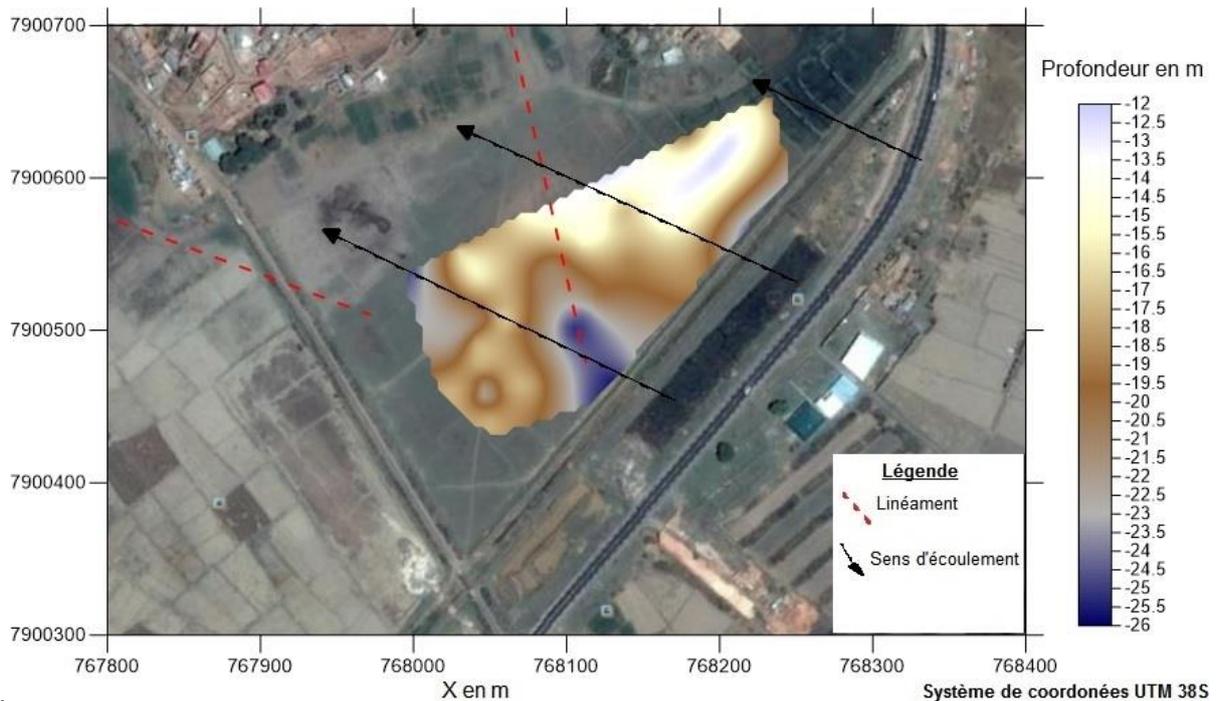


Figure 8 - Carte du toit du substratum

Conclusion

La démarche menée dans la zone limite entre les villages d'Ankaraobato et de Dorodosy donne beaucoup plus d'informations pertinentes sur la structure hydrogéologique de la zone prospectée que la démarche classique menée dans un tel cas d'étude. L'étalonnage de la coupe géoélectrique avec le log de forage disponible a permis de fixer les valeurs de résistivités électriques de chaque horizon géologique, contact alluvions/latérite et toit de la roche imperméable.

Même si la zone est constituée d'un système aquifère assez complexe, une succession de trois nappes de type libre, semi-captive et de fissuration, la vision en deux dimensions (2D) de la structure du sous-sol, en particulier celle des aquifères, a permis la compréhension notable de la structure des aquifères et le modèle hydrodynamique de l'eau qu'ils contiennent.

Le résultat de la modélisation montre relativement bien les trois directions d'écoulement des eaux des trois aquifères observés dans le sous-sol. L'hydrodynamique est ici contrôlé à la fois par le contexte hydrogéologique général et par la forme locale des aquifères.

On peut déduire de cette modélisation la potentialité en eau souterraine de la zone étudiée et on peut bien penser à reproduire ce type d'approche partout au niveau de la plaine du Betsimitatatra dans des études hydrogéologiques axées sur l'implantation de forages d'eaux souterraines ou encore de mise en place de familles de piézomètres nécessaires dans l'étude hydrodynamique des écoulements d'eaux souterraines de la plaine.

Références bibliographiques

- BOURGEAT F., 1968. Notice carte pédologique de Tananarive, Centre ORSTOM de Tananarive
- CASTANY G., 1982, Principes et méthodes de l'Hydrogéologie, Dunod, Paris, 236 pages
- CHAPERON P., DANLOUX J., FERRY L. (1993). Fleuves et rivières de Madagascar, *Paris : ORSTOM*, (10), 874 p.
- COLLIN J.J., 2004, Les eaux souterraines, connaissance et gestion, Edition BRGM
- COURTOIS N., BECHENNEC F., 1999 - Ressources en eaux souterraines en zone de socle de la Vendée - *Aspects quantitatifs* - BRGM
- DAHLIN L.T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 7, 275–283.
- DUSSARAT B., 1992 : Hydraulique des unités d'interfluves et de bas-fonds tourbeux: un exemple en zone de socle altéré (Madagascar). *Thèse de Doctorat – Université de Montpellier*, 171 pages et annexes.
- DUSSARAT B., RALAIMARO J., 1993. Caractérisation hydrogéologique de bassins versants emboîtés sur socle altéré en zone tropicale d'altitude : exemple des Hautes Terres de Madagascar. *Hydrogéologie*, p 53-64
- GRILLOT J.C., BLAVOUX B., RAKOTONDRAINIBE J.H., RAUNET M., 1989, Dynamique en hautes eaux des aquifères d'altérites sur les Hauts-Plateaux cristallophylliens de Madagascar. *Journal of African Earth Sciences, and the Middle East*, Vol 9 issues 3-4 : 599-607.
- KOUASSI A.M., KADIO K.K.R., AHOUSSE K.E., BIEMI J, 2014, Stratégie de prospection hydrogéologique par prévision de l'épaisseur de socle à forer, *Larhyss Journal*, pp. 209-224
- LAPLAINE (L) 1953 - feuille géologique Tananarive/Miarinarivo au 1/100.000- *Trav. bureau Géol. - Tananarive n° 19*, 73p

LOKE M.H., 2010a. RES2DINV ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *Geotomo Software. Manual*

LOKE M. H., BARKER R. D., 1996, Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, Vol 44, 1, 131-152

LOKE, M.H., ACWORTH I., DAHLIN T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34, 182-187.

RAKOTO H., ANDRIEUX P., RATSIMBAZAFY J. B., ILLICETO V., RASOLOMANANA E. H., PASTOR L., ZUPPI G.M., 2003, La prospection gravimétrique dans la modélisation d'un substratum sous formation sédimentaire : Apport à l'hydrogéologie d'une zone semi-aride du sud de Madagascar, *C. R. Géosciences, Volume 335,ISSN 1631-0713, pp 355-363.*

RANDRIANARIVO I. H., 2012, Contribution à l'étude géomorphologique de la principale butte d'Antananarivo, Mémoire de Maîtrise en Géographie, Département de Géographie. Faculté des lettres et des sciences humaines, Université d'Antananarivo.