



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 355–363



Géophysique interne

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

Heritiana Rakoto^{a,b,*}, Pierre Andrieux^c, Jean-Bruno Ratsimbazafy^a, Vittorio Iliceto^d,
Eddy Rasolomanana^a, Louis Pastor^c, Gian Maria Zuppi^b

^a Institut et observatoire de géophysique d'Antananarivo (IOGA), BP 3843, 101 Antananarivo, Madagascar

^b Università Cà Foscari di Venezia, Calle Larga Santa Marta, Dorsoduro 2137, 30123 Venezia, Italy

^c Département de géophysique appliquée, université Paris-6, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^d Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università degli Studi di Padova, via Giotto 1, 35137 Padova, Italy

Reçu le 24 juillet 2002 ; accepté le 3 mars 2003

Présenté par Jean-Paul Poirier

Résumé

La méthode gravimétrique a été utilisée dans le bassin sédimentaire de la zone semi-aride du Sud de Madagascar pour déterminer la morphologie du toit du substratum, qui est constitué de roches cristallines et volcaniques. La structure morphologique du substratum influe sur l'hydrogéologie et la dynamique de l'eau souterraine de la zone. La corrélation entre la répartition de la conductivité électrique de l'eau et la morphostructure du substratum (forme et linéament) confirme l'étroite dépendance des deux paramètres, et permet par la suite de délimiter la zone favorable à l'exploitation future de l'eau. **Pour citer cet article : H. Rakoto et al., C. R. Geoscience 335 (2003).**

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

A gravimetric survey to map the top of the bedrock under sedimentary formations: a contribution to the hydrogeology of the semi-arid southern area of Madagascar. A gravimetric survey has been carried out in a sedimentary basin, south of Madagascar, in order to define the bedrock morphology. The bedrock is made up of crystalline and volcanic rocks. The objective of the survey was to demonstrate whether a relationship could be established between bedrock morphology and groundwater mineralisation. Indeed, bedrock morphology has been successfully mapped and it is confirmed that most of the low mineralisation wells are located in areas where the slope of the bedrock is trending to the south-west, which ensures a higher hydraulic conductivity, i.e. a faster water flow, than in the other parts of the survey area. **To cite this article: H. Rakoto et al., C. R. Geoscience 335 (2003).**

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : gravimétrie ; bassin sédimentaire ; Sud de Madagascar ; substratum ; hydrogéologie ; minéralisation ; semi-aride

Keywords : gravimetry ; sedimentary basin ; South of Madagascar ; bedrock ; hydrogeology ; mineralisation ; semi-arid

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : h_rakoto@hotmail.com (H. Rakoto).

Abridged English version

A gravimetric survey has been carried in a southern basin of Madagascar, in order to determine its basement morphology in the framework of a hydrogeological study. The area extends over 5100 km² and is centred around 25°10'21.1" southern latitude and 45°03'31.1" eastern longitude. The basin is bound to the south, by coastal dunes, to the west by the Menarandra River, to the east by the Manambovo River and to the north by crystalline, metamorphic and intrusive formations [4,5] (Fig. 1). The area is a peneplain gently sloping to the south. It is made up of a multitude of closed basins within the plateau areas as well as within the dune zone. Post-Eocene sediments cover most of it [3,4,9]; bedrock outcrops are rare. Few drillholes within the area enables to have a sound knowledge of the geological sequence.

The climate is semi-arid with an average annual rainfall equal to 525 mm, while potential evapotranspiration is equal to 1250 mm [7].

Both Menarandra and Manambovo Rivers are ephemeral, with strong floods in summertime [14]. Recharge is ensured partly by rainfall and partly by drainage from crystalline bedrock. The water table is assumed to be continuous, starting from weathered bedrock to the northeast, through continental Neogene, down to the sea, after it has crossed the coastal part or the alluvium of the river banks (Fig. 1) [2]. The groundwater flow is generally trending from the northeast down to the southwest. During recharge and residence, groundwater gets mineralised. It is characterised by high electrical conductivities (greater than 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$), related to high concentrations of dissolved salts (NaCl) [2,14]. Water electrical conductivity distribution however appears to be random and thus cannot be explained by local geology. Besides, drilling logs tend to show different lithological origins for groundwater at the various sites (Fig. 2).

Both surface and underground waters are rare in the area. Lack of hydrogeological and hydrochemical information has led to a low drilling success rate. Assuming the bedrock to be impermeable, it is inferred that the geometry of the aquifer and that its recharging through the porous sedimentary medium will highly depend on the topography of the basement [11] and on its tectonic history, which may have an effect on the flow and thus on the hydrodynamic transit rate [6].

Morphological information regarding the bedrock will thus contribute to the knowledge of the local hydrogeology and to the groundwater flow system of the area. This is the reason why a gravimetric survey has been carried out, in order to map the structure of the basement, thought to affect the groundwater flow pattern.

Two gravimetric datasets are available for the area. The first one was collected many years ago by one IRD ('Institut de recherche pour le développement', formerly ORSTOM, France) team [13], with a large spacing between stations, of the order of 2 km; 72 stations were recorded within the study area. The second one was collected by the IOGA ('Institut et Observatoire géophysique d'Antananarivo') team, specifically for this detailed survey, with an average spacing of 200 m along roads and trails; 347 stations were surveyed. A total of 419 gravimetric stations is thus available.

The base values were extracted from the IRD dataset [13]. Since the area shows no topographic features, the technique proposed by Parasnis [12] was used to determine the average density to be introduced into the Bouguer corrections. This technique assumes that the Bouguer anomaly is a random function over the whole area [10,12]; the value of the density is thus equal to the slope of the average linear relationship between the free air anomaly and the altitude; in the study area, it is found equal to 2.48. The regional Bouguer anomaly was then computed from the IRD data, using a second order polynomial surface. Modelling of the residual gravimetric anomaly was at last performed using the software Grav2dc V2.0 by G.R.J. Cooper (1996) along each profile. Five different formations, with their specific density were introduced, referring to the known geological situation [1, 8]: the light sedimentary cover ($d = 1.88$), the average sedimentary formation ($d = 2.18$), the crystalline basement ($d = 2.48$), the heavy volcanic ($d = 3.28$) and intrusive formations ($d = 3.08$).

A general northeast/southwest dip of the basement is clearly shown; besides, three major depressions are mapped (Fig. 3).

In order to enhance the rather small altitude variations of the basement, to show the extreme and possible lineaments, the first and second horizontal derivatives of the altitudes were also computed (Fig. 4). The water electrical conductivity values measured at each well are shown on the map of the dip changes of the

basement (Fig. 4). It can be seen that eight wells out of 10, with conductivities lower than $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$, are located in areas where the basement is dipping towards the south, which favours the flow. In other areas, the water resides during longer periods of time, so that mineralisation tends to increase.

It can thus be concluded that there is a fair correlation between the basement morphology and the water quality, so that gravity in this example appears to be a great help to locate positive water wells.

1. Introduction

Le bassin sédimentaire de l'extrême Sud de Madagascar s'étend sur une superficie de 5100 km^2 (Fig. 1) environ, centré sur $25^\circ 10' 21,1''$ de latitude sud et $45^\circ 03' 31,1''$ de longitude est.

Le bassin est limité au sud par le couloir littoral de dunes qui se développe entre la grande falaise, prolongement de la faille de Tuléar, et le canal de Mozambique, à l'ouest par le fleuve Menarandra, à l'est par le fleuve Manambovo et au nord par la formation cristalline de type métamorphique et intrusif [4,5].

Le bassin sédimentaire, formé d'une pénéplaine inclinée légèrement vers la mer de 250 à 130 m d'altitude, est constitué de plusieurs cuvettes fermées, de différentes dimensions, d'une part, dans les zones tabulaires, d'autre part, dans les régions dunaires.

La région se caractérise par une précipitation moyenne annuelle de 525 mm, répartie sur la période octobre–mars, et une évapotranspiration potentielle de 1250 mm [7].

Les deux fleuves, Menarandra et Manambovo, ont un régime irrégulier. Les orages ou les pluies de forte intensité engendrent des crues relativement importantes, dont le tarissement est rapide [7]. Le réseau hydrographique secondaire est rare et n'est pas pérenne [7,14].

Les eaux y sont rares, tant de surface que souterraines. Beaucoup de forages de reconnaissance d'eau souterraine réalisés ont été des échecs, à cause de l'insuffisance des connaissances de l'hydrogéologie régionale.

La modélisation du toit du substratum par technique gravimétrique a été réalisée dans le but de suivre la morphologie du substratum imperméable, constitué

de roches cristallines et volcaniques. Cette information devrait contribuer à une meilleure connaissance de l'hydrogéologie de la zone.

2. Contextes géologique et hydrogéologique, données gravimétriques

Le bassin sédimentaire est formé de dépôts terrigènes, allant de l'Éocène à l'Actuel [3,4,9]. Les affleurements y sont rares (Fig. 1). Les quelques forages de reconnaissance géologique réalisés ont permis d'obtenir des informations sur la succession des formations géologiques du bassin :

- des alluvions récentes dans les vallées des fleuves et rivières ;
- des sables, éventuellement dunaires, et des grès sur quelques dizaines de mètres ;
- des calcaires quaternaires et calcaires marneux, sur une épaisseur d'environ 40 m, des grès néogènes continentaux, d'une épaisseur pouvant atteindre 300 m (ces formations dont les perméabilités sont d'environ 10^{-5} m s^{-1} [2] constituent l'aquifère principal) ;
- enfin, le socle imperméable, constitué de roches granitiques et leptynitiques au nord et basaltiques au sud-ouest.

Du point de vue hydrogéologique, la continuité du niveau statique conforte l'hypothèse d'une nappe générale qui se raccorde aux eaux marines sur le littoral et aux nappes alluviales dans les vallées des grands fleuves (Fig. 1). La circulation souterraine des eaux se ferait du nord-est vers le sud-ouest (Fig. 1).

Les nappes perchées discontinues se positionnent sur les zones de recharge préférentielles en correspondance avec les cuvettes fermées.

Les eaux souterraines ont une conductivité électrique élevée, en général supérieure à $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$, qui est en relation avec les teneurs élevées en sels et en particulier en chlorures [2,14]. Une carte de conductivité a été dressée, malgré la mauvaise répartition des forages et l'insuffisance de données sur les caractéristiques physique et chimique de l'eau souterraine. Les connaissances géologiques sont insuffisantes pour expliquer les variations de la conductivité électrique de l'eau (Fig. 2).

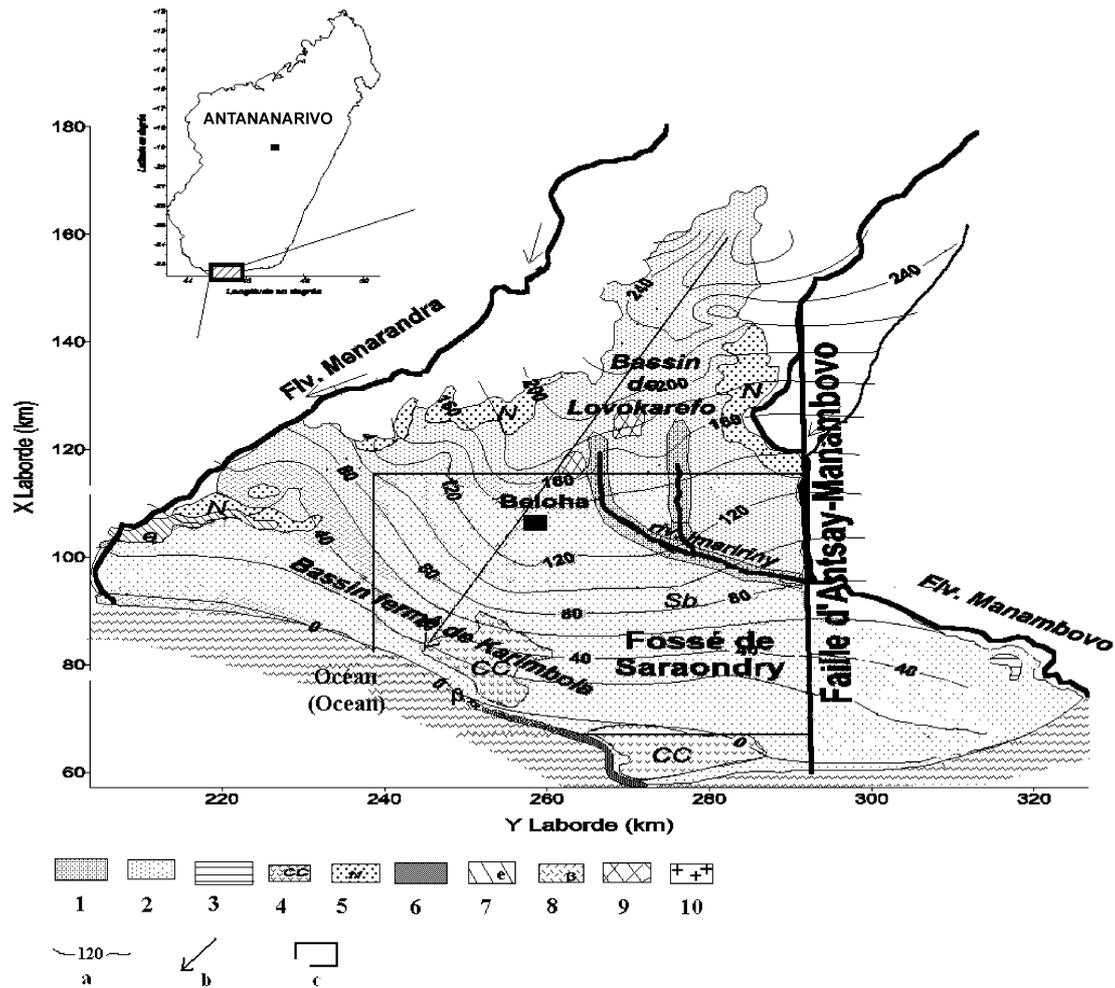


Fig. 1. Situation de la zone d'étude. 1 : Alluvions ; 2 : sables et dunes ; 3 : grès ; 4 : carapace calcaire ; 5 : Néogène continental ; 6 : Calcaires marneux ; 7 : Éocène calcaire ; 8 : basaltes ; 9 : leptynite ; 10 : granitique ; a : cote piézométrique (m) ; b : direction de l'écoulement général ; c : zone couverte par la géophysique.

Fig. 1. Location of the survey area. 1: Alluvium; 2: sands and dunes; 3: sandstones; 4: limestone shales; 5: continental Neogene; 6: marl calcareous; 7: Eocene limestone; 8: basalt; 9: leptynite; 10: granite; a: water level (m a.s.l.); b: regional groundwater flow; c: study area.

Les venues d'eau peuvent provenir d'aquifères de type lithologique, différents d'un forage à un autre (Fig. 2), ce qui complique la compréhension de la circulation et de la minéralisation de l'eau souterraine, et la délimitation des zones favorables pour son exploitation.

La zone a fait l'objet de deux campagnes de prospection gravimétrique. La première a été réalisée par Rechenmann et l'équipe de l'IRD (ex-Orstom) [13],

avec un pas de mesure de 2 km ; la seconde a été réalisée par l'équipe de l'IOGA, avec un pas de 200 m.

Les mesures ont été faites sur les pistes existantes (Fig. 3b) : 72 ont été réalisées lors de l'étude de l'IRD [13] et 347 lors de l'étude détaillée. Les données de détail n'ont pas couvert la totalité de la zone sédimentaire de l'extrême Sud : elles ont été acquises sur les zones estimées les plus intéressantes (zone à importante anomalie de Bouguer de la première

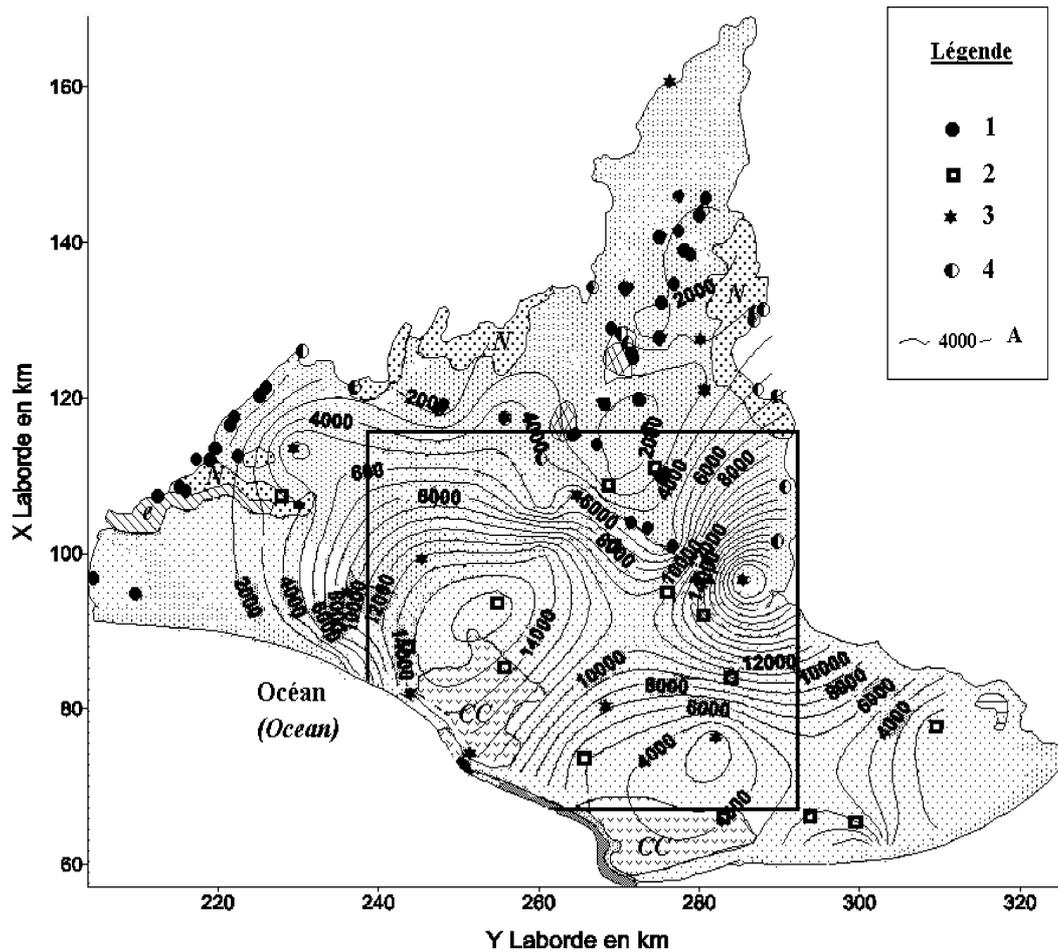


Fig. 2. Carte de conductivité électrique de l'eau. Type lithologique des aquifères. 1 : Alluvions ; 2 : Quaternaire ancien ; 3 : Néogène ; 4 : socle fissuré ; A : Conductivité électrique de l'eau ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

Fig. 2. Electrical conductivity of water. Aquifer lithology. 1: Alluvial deposits; 2: Quaternary; 3: Neogene; 4: fractured basement; A: water electrical conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

campagne, linéament morphologique, zones à forte probabilité d'eau souterraine).

3. Présentation et objectif de l'étude

En prenant l'hypothèse d'un substratum granitique, leptynitique et volcanique imperméable, la circulation de l'eau dans le milieu poreux devrait être fonction de la topographie et de la morphologie du substratum imperméable [11].

En outre, les accidents tectoniques pourraient jouer le rôle de zones à transfert hydrodynamique rapide [6]. La morphostructure du substratum imperméable in-

fluerait ainsi sur la circulation de l'eau souterraine. La reconstruction de cette structure par la gravimétrie, et la comparaison entre la topographie du substratum et la conductivité électrique de l'eau devraient permettre de comprendre l'hydrodynamique de la région.

4. Traitement des données gravimétriques et leur modélisation

4.1. Traitement de données

Les données gravimétriques de la deuxième campagne ont été réduites [8] en sélectionnant comme sta-

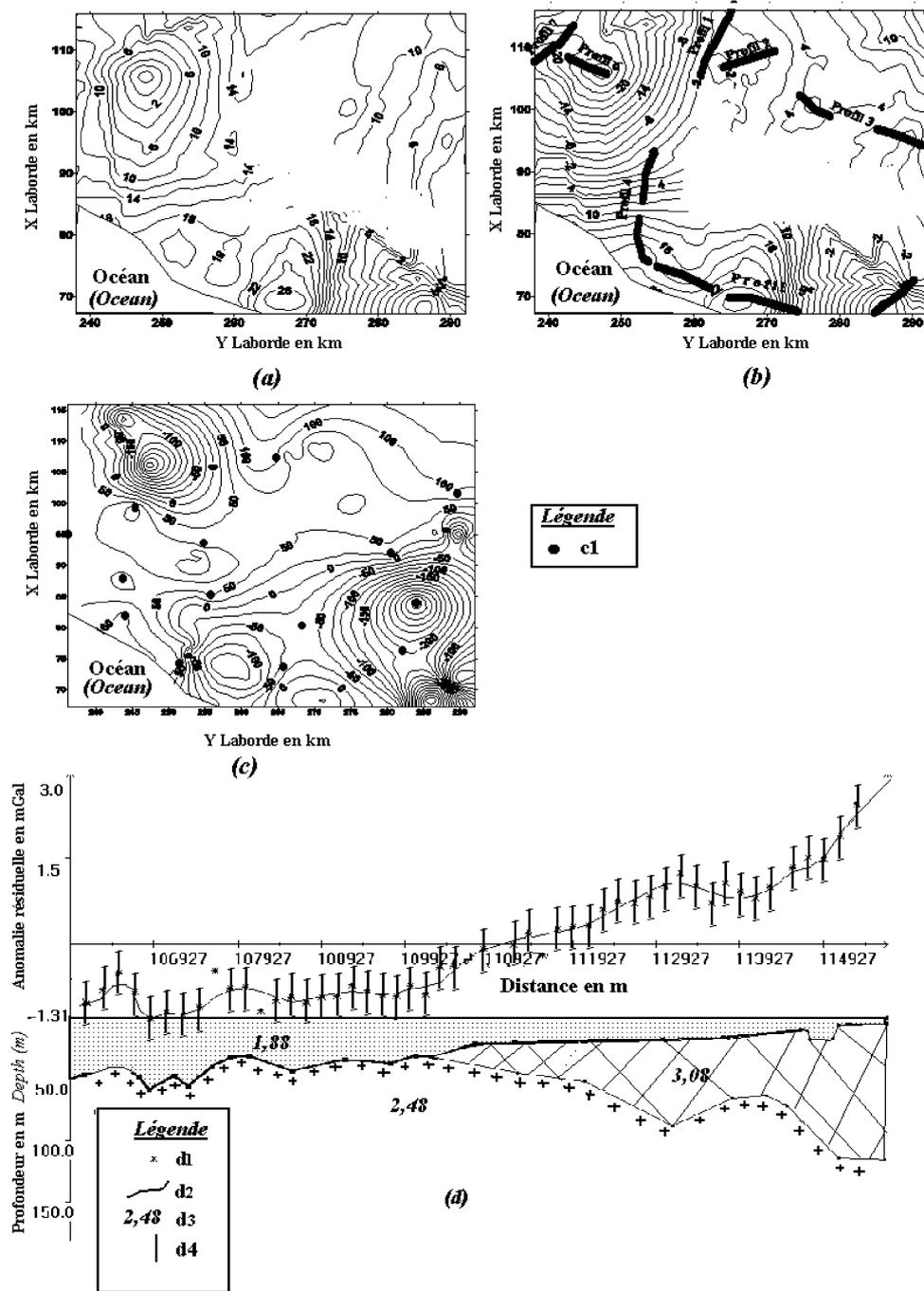


Fig. 3. Cartes d’anomalies, carte de la cote du toit de substratum et modèle de densité le long d’un profil. (a) Carte de l’anomalie de Bouguer (mGal); (b) carte de l’anomalie résiduelle (mGal); (c) cote de toit du substratum (m) – c1 : forage –; (d) modèle de densité – d1 : valeurs observées; d2 : valeurs calculées; d3 : densité, d4 : barre d’erreur.

Fig. 3. Bouguer anomalies, basement top level and density cross-section. (a) Bouguer anomaly (mGal); (b) residual anomaly (mGal); (c) basement top level (m a.s.l.) – c1: drilling –; (d): density model – d1: observed values; d2: calculated values; d3: density; d4: misfit.

tions de base des stations particulières de l'IRD (ex-Orstom) [13].

Le système de calcul du champ gravimétrique théorique utilisé dans le calcul de l'anomalie de Bouguer (Fig. 3a), est pour des raisons faciles à comprendre celui utilisé par l'IRD lors de la première phase. C'est donc la formule de Postdam, 1967, qui a été appliquée.

En ce qui concerne le calcul de la densité de la plaque de Bouguer et de la correction de relief, compte tenu de la topographie relativement plane, sans accident topographique majeur, c'est la méthode de Parasnis qui a été utilisée. En accord avec la définition de l'anomalie de Bouguer, cette méthode postule que l'anomalie de Bouguer est statistiquement nulle sur l'ensemble d'une zone d'étude dont la surface est horizontale [10,12].

Cette condition s'exprime sous la forme suivante :

$$\sum (0,0419 \rho h_i - 0,3086 h_i + \rho T_i + g_{th,i} - g_{m,i}) = 0$$

où h_i est l'altitude, ρ est la densité et les g sont successivement les champs de pesanteur théorique et calculé. Pour une topographie négligeable, $T \approx 0$, d'où :

$$\sum (g_{m,i} - g_{th,i} + 0,3086 h_i) - (0,0419 \rho h_i) = 0$$

Par conséquent, les points représentatifs des variations de l'anomalie à l'air libre en fonction de l'altitude sont distribués aléatoirement autour d'une droite, dont la pente est égale à la densité moyenne de correction à appliquer pour que cette équation soit vérifiée. La valeur moyenne de la pente obtenue sur notre zone d'étude conduit à une densité égale à 2,48. La précision sur l'anomalie à l'air libre et sur l'anomalie de Bouguer dépend bien entendu de la qualité du nivellement. Dans notre zone d'étude, l'erreur sur l'altitude est inférieure à 3 m pour les données de l'IRD [13] et inférieure à 1 m pour les données de l'IOGA. L'erreur sur l'anomalie de Bouguer ainsi calculée est alors inférieure à 0,7 mGal. Le relief de la région étant très peu accentué (entre 130 et 250 m), les corrections de relief étaient de l'ordre de 0,1 mGal, ce qui justifie qu'elles aient été négligées.

Enfin, compte tenu des longueurs d'onde spatiale des anomalies résiduelles recherchées, l'anomalie régionale [8] a été calculée à partir des données de l'IRD (1981), à l'aide d'une surface polynomiale de degré 2.

4.2. Modélisation gravimétrique

La modélisation est faite à l'aide d'un programme de modélisation directe 2,5D basée sur des prismes de section polygonale et d'allongement limité dans la direction perpendiculaire au profil.

Elle postule l'existence de cinq formations de densités différentes, à partir de la géologie régionale et des connaissances générales sur les formations [1, 8] :

- la couverture sédimentaire constituée des formations sableuses et dunaires, de densité $d = 1,88$;
- la formation moyennement dense est représentée à la fois par les calcaires et les grès néogènes, de densité 2,18 ;
- le substratum constitué de leptynites de densité 3,08 et/ou les formations granitiques de densité 2,48 (Fig. 3d) et enfin les formations basaltiques de densité 3,28.

La carte du toit du substratum a été tracée à partir des résultats des modélisations des sept profils (Fig. 3b).

5. Résultats et discussion

Outre le pendage général de direction nord-est-sud-ouest du toit du substratum, le modèle présente trois zones de dépression (Fig. 3c) : la première se situe à l'intérieur de l'alignement du fossé de Saraondry (Fig. 1), la seconde se trouve juste à l'est de Vohipa, où le basalte et le socle cristallin affleurent et la troisième est située au sud-ouest de Kirimosa.

Afin de mieux mettre en évidence les variations d'altitude de faible amplitude du toit du substratum, il nous a paru intéressant de présenter les cartes des dérivées horizontales première et seconde, calculées à partir de la carte présentée ci-dessus (Fig. 3c).

Les points hauts et bas du toit du substratum correspondent aux points où la dérivée première s'annule. La direction du pendage est celle de la direction du gradient horizontal. La dérivée seconde caractérise les variations des pentes ; ses valeurs nulles indiquent les lieux de rupture de pente.

En examinant simultanément la carte des valeurs de la conductivité électrique de l'eau mesurée dans les fo-

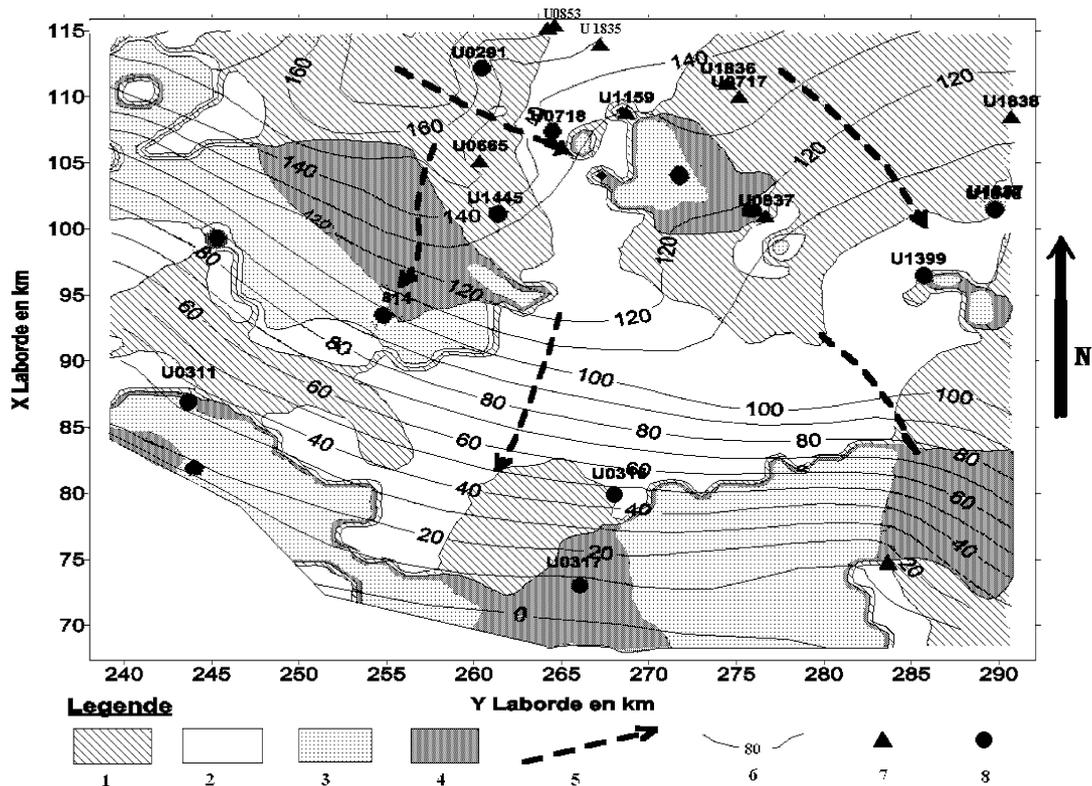


Fig. 4. Carte de la direction de pendage du toit de substratum et points de forage. 1 : Pendage vers le sud-ouest ; 2 : pendage vers le sud-est ; 3 : pendage vers le nord-est ; 4 : pendage vers le nord-ouest ; 5 : direction de l'écoulement de l'eau ; 6 : niveau piézométrique (m) ; 7 : forage où la CE de l'eau est inférieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8 : forage où la CE de l'eau est supérieure à $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Fig. 4. Dipping of the basement and conductivity of water. 1: Dipping towards the southwest; 2: dipping towards the southeast; 3: dipping towards the northeast; 4: dipping towards the northwest; 5: groundwater-flow direction; 6: water-table level (m); 7: borehole with WEC $< 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$; 8: borehole with WEC $> 4500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

rages, la carte de la direction du pendage et la carte de la dérivée de l'altitude du toit du substratum (Fig. 4), nous pouvons formuler les remarques suivantes :

- huit points d'eau sur dix, qui ont une conductivité relativement faible, se trouvent dans la zone où le toit du substratum présente un pendage vers le sud-ouest, et sept points d'eau sur onze, qui ont une conductivité relativement élevée, se situent dans la zone où le toit du substratum a un pendage nord-est et nord-ouest ;
- la conductivité électrique de l'eau augmente néanmoins progressivement en allant vers le sud-ouest.

On est donc tenté de conclure que le substratum joue un rôle important dans la circulation de l'eau : il ralentit le mouvement de l'eau quand il présente un

pendage vers le nord-ouest et le nord-est et favorise sa circulation dans le cas contraire. La faible circulation de l'eau se traduit par une augmentation de son temps de séjour au sein de l'aquifère et, par conséquent, par une augmentation de sa minéralisation, donc de sa conductivité électrique.

6. Conclusions

La connaissance de l'allure du toit du substratum d'un aquifère poreux est un apport intéressant dans la compréhension de la circulation de l'eau souterraine, qui peut compléter et confirmer les informations hydrodynamiques et hydrochimiques. Elle peut donner, en outre, des informations a priori sur la qualité probable d'eau, comme l'a montré, dans notre

zone d'étude, la corrélation avec la conductivité électrique.

En effet, la remarquable corrélation entre les données de conductivité électrique de l'eau et celles de la morphologie du toit du substratum permet de délimiter la zone d'alimentation et la (ou les) zone(s) de drainage de cette région semi-aride de Madagascar.

En conclusion, dans les zones à topographie relativement plane et constituées d'un milieu poreux à conductivité électrique élevée au-dessus d'un socle imperméable, l'application de la géophysique, en particulier de la gravimétrie, donne de bons résultats du point de vue de la recherche hydrogéologique.

Remerciements

Mes remerciements vont particulièrement à M.Y. Albouy (IRD) pour ses critiques constructives et à l'IOGA, au projet Campus et à l'ICTP (International Center of Theoretical Physics) qui ont facilité la réalisation de ce travail.

Références

- [1] M. Annechionne, La contribution de la gravimétrie à l'étude hydrogéologique de la Moraine Oak ridges, mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, École polytechnique de Montréal, Canada, 2000.
- [2] J. Aurouze, Hydrogéologie du Sud de Madagascar, thèse de doctorat ès sciences, Paris, 1959.
- [3] H. Besairie, Géologie de Madagascar, Service géologique Antananarivo–Madagascar, MEM, 1963.
- [4] H. Besairie, Carte géologique, Feuille AMPANIHY 1/500 000, Service géologique, 1970.
- [5] H. Besairie, Traits majeurs de la géologie structurale de Madagascar, RAST, 1973.
- [6] T. Bonnet, J.-P. Colbeaux, L'analyse morphologique spécialisée : apports d'une méthode à la détection des accidents, une nécessité dans l'approche hydrodynamique et karstologique des aquifères fissurés. Exemple dans le Nord de la France crayeux, *Geodin. Acta* 3–4 (1999) 223–235.
- [7] P. Chaperon, J. Danloux, L. Ferry, Fleuves et rivières de Madagascar, Orstom, CNRE, DMH, 1993.
- [8] M. Chouteau, Géophysique appliquée I, 7.440 Gravimétrie, Cours en ligne, Génie minéral, Ecole Polytechnique de Montréal, 1999.
- [9] A. Domergue, Données géologiques nouvelles apportées par les forages, Campagne 1961, Service géologique Antananarivo–Madagascar, MEM, 1963.
- [10] J. Dubois, M. Diament, Géophysique, Masson, Paris, 1997.
- [11] R.A. Freeze, J.A. Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [12] D.S. Parasnis, Principles of Applied Geophysics, 4th edn., Chapman & Hall, London, 1996.
- [13] J. Rechenmann, Gravimétrie de Madagascar. Interprétation et relations avec la géologie, thèse d'État, UPMC, Paris 6, Mémoire Orstom, Orstom Éditions, Paris, 1982.
- [14] A.J. Wesselink, Stratégie du développement régional de l'eau dans le Sud de Madagascar, CGDIS, 1996.