

Problèmes de pollution des ressources en eaux posés par les déchets industriels et ménagers dans la ville d'Antananarivo et de ses environs

RASOLOMANANA E.^{1,2}, RASOLONDRAZAO L.², RANDRIANJA R.¹, ROBISON L.^{3,1}, RALAIMARO J.³, RAKOTO H.^{2,1}

1 Dpt Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

2 Labo de Géophysique Appliquée, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

3 Dpt Systèmes aquatiques et côtiers, Centre National de Recherches sur l'Environnement

Résumé - Les études géophysiques et hydrochimiques de la plaine d'Antananarivo ont commencé au mois de Mai 2005. Au total, 77 sites de la plaine ont été visités et étudiés. Photos aériennes, images satellites, modèles géologique et hydrogéologique, MNT de la plaine et combinaison des SIG Mapinfo et Arcview, prélèvements et analyses d'échantillons d'eau, imageries géophysiques 2D et 3D (électrique) ont été utilisés dans la modélisation de la plaine. Des cartes de la qualité de l'eau en éléments majeurs et en métaux (plomb, chrome) et des coupes géophysiques de résistivité caractérisant la nature du sous-sol et montrant l'état actuel de la Plaine en sont les principaux résultats.

Mots-clés - Plaine d'Antananarivo, pollution, aquifères, photo-interprétation, hydrochimie, imageries géophysiques

Introduction

Antananarivo, avec son rythme de développement actuel (*urbanisation, implantations de diverses zones industrielles, démographie galopante*), risque d'être confrontée d'ici quelques années à des problèmes majeurs touchant son environnement physique. En effet, l'expansion et l'intensification des activités humaines sont les principales sources de pollution du milieu naturel, en particulier les sols et les nappes d'eaux souterraines. Antananarivo n'a pas échappé à ces problèmes. Il est clair que cette évolution est préoccupante pour la majeure partie de la population qui ne dispose que de cette ressource naturelle pour s'approvisionner en eau potable. Un projet CORUS financé par le Ministère des Affaires Etrangères françaises et mené au sein du Département Mines de l'ESPA s'est proposé de dresser l'état physico-chimique actuel de la Plaine d'Antananarivo dont une description sommaire est donnée dans la suite. Il s'agissait de mettre en évidence, par une cartographie et une caractérisation géophysique et hydrochimique appropriées, d'éventuelles signatures de polluants physiques et chimiques autour d'un certain nombre de sites industriels et de zones de décharges ménagères, industrielles ou autres.

Méthodologie

L'approche diffère de celles menées habituellement dans ce genre d'études et trouve son originalité dans la combinaison de l'outil géophysique 2D et 3D et de l'hydrochimie, l'utilisation d'une centrale mobile d'acquisition de paramètres hydrogéologiques pour le suivi à court et moyen termes. L'exploitation d'un modèle numérique de terrain, des photos aériennes et des images satellites a été abordée dans la description morphologique des sites ainsi que dans la distribution du réseau hydrographique drainant la plaine d'Antananarivo.

Cadre géographique

La zone d'étude s'étend dans un rayon d'une vingtaine de kilomètres autour de la ville d'Antananarivo. Elle se développe largement sur Antananarivo Renivohitra mais également dans les Districts d'Atsimondrano, d'Avaradrano et d'Ambohidratrimo.

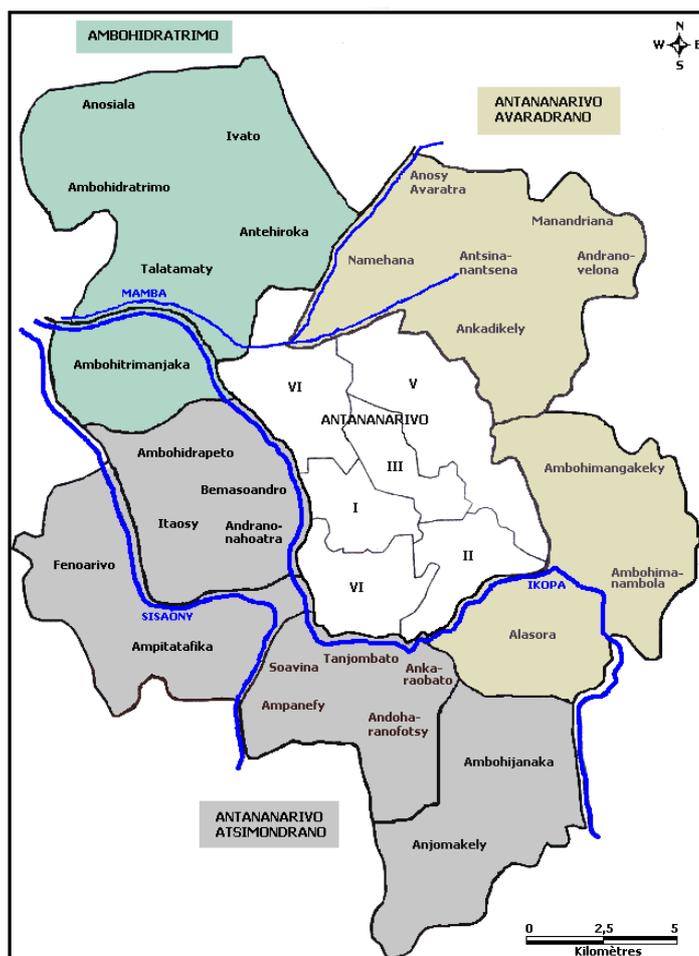


Figure 1- La région d'étude, Antananarivo et les Districts environnants

Contexte géologique

Antananarivo est caractérisé par des bas-fonds et des plaines alluviales emboîtées dans une épaisse couverture altéritique, dominée par des reliefs d'orientation E-W ; l'ensemble reposant sur un socle du Précambrien métamorphique. La plaine alluviale est le résultat du remplissage d'un compartiment effondré du socle. La succession des faciès alluvionnaires est, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base : une formation limono-argileuse superficielle peu épaisse, qui constitue le substratum des rizières ; des argiles jaune ou grises, plus ou moins mélangées à de la tourbe ; un niveau d'argiles blanches, kaoliniques plus ou moins sableuses et des sables. Ces alluvions reposent sur des arènes non remaniées, issues de l'altération du socle sous-jacent. En dehors de la vaste plaine alluvionnaire, les bas-fonds du Nord et de l'Est sont issus des phénomènes de néo-tectonique, des mouvements verticaux du cristallophyllien et des processus d'altération/érosion. La séquence des matériaux de remplissage est comparable à celle observée dans la plaine alluviale.

Hydrogéologie

Le principal réservoir aquifère de la zone est celui constitué par les **sables alluvionnaires** qui se sont déposés dans la plaine du Betsimitatatra. Ce niveau, présent sur l'ensemble de la plaine, est souvent épais de plus d'une dizaine de mètres.

Compte tenu de sa perméabilité, ce niveau joue le rôle de drain. De plus son alimentation se fait majoritairement via les arènes granitiques. Au droit des interfluves, la formation altéritique kaolinique est une couche aquifère qui abrite une nappe libre. Cette nappe est actuellement exploitée pour l'alimentation des populations au travers de puits individuels. De

nombreuses sources qui émergent de ce niveau permettent également la mise en eau des rizières, y compris pendant l'étiage.

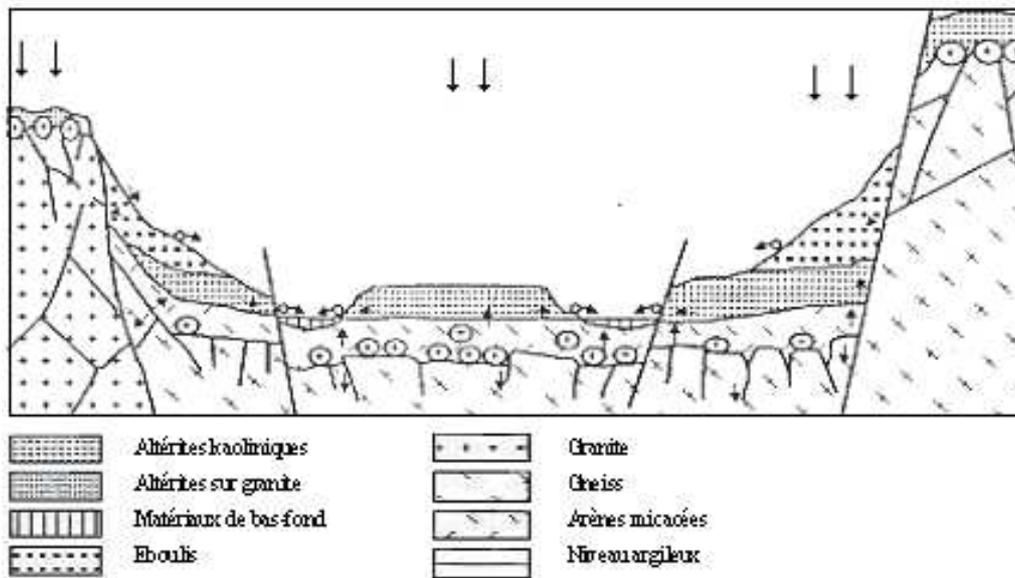


Figure 2- Principe du fonctionnement hydrogéologique des interfluvés et des bas-fonds

Présentation des résultats

Il s'agit de mettre en évidence les différentes formations rencontrées à moins de 20m de profondeur : couverture superficielle, sables alluvionnaires aquifères, arènes argilo-sableuses aquifères, substratum imperméable d'après les contrastes de résistivité observés et, de proposer le faciès chimique des eaux prélevées, notamment souterraines. Un résistivimètre Syscal R2 mettant en œuvre le système multiélectrodes, un conductivimètre et un pH-mètre pour les mesures *in situ* ont été utilisés. Les analyses chimiques des majeurs et des métaux (*chrome, plomb*) ont été faites dans des laboratoires d'analyses chimiques sis à Antananarivo. Les modèles géophysiques en 2D et les résultats des analyses hydrochimiques avec leurs interprétations respectives sont présentés, ci-après. On essaiera, d'après les signatures physico-chimiques conséquentes, d'en déduire si, oui ou non, il y a éventuellement pollution du sol et des nappes d'eaux souterraines sous-jacentes.

Géophysique

Les mesures ont été faites au cours de différentes périodes allant de 2003 à 2007. Une coupe 2D (x,z) et 3D (x,y,z) réalisée à Ivato (Entreprise en Zone Franche) représentant les 30 panneaux implantés dans la plaine a été choisie et présentée dans la suite. Soulignons aussi que les polluants chimiques, en augmentant le taux des matières solides dissoutes, tendent généralement à diminuer les valeurs des résistivités du milieu qu'ils contaminent, notamment l'eau. Il faut savoir que la plupart des usines près desquelles ont été implantées les stations de mesures travaillent pratiquement toutes dans le textile (*teinturerie, confection*) et utilisent des colorants et des métaux (*chrome, plomb*), des détergents et des mouillants. D'autres, travaillent dans la papeterie et le traitement de peaux de zébus. Ces usines rejettent, tous, leurs déchets dans la nature.

Ambivy Tanjombato

La station de mesure électrique est implantée, juste en face des zones franches textiles de la Zone Industrielle Forello, dans une des parcelles des rizières qui bordent les usines. Au moment des mesures, les rizières étaient saturées d'eau.



Photo 1- Ambivy Tanjombato, site de mesures

On peut dire que les terrains argileux, partie Ouest, ou plus sableux à l'Est, comme l'atteste la coupe de chargeabilité avec ces valeurs de chargeabilité relativement élevées de 3 à 6 mV/V, sont bien contaminées par les eaux résiduelles provenant des usines en question. En effet, la coupe de résistivité apparaît avec des valeurs de centrées autour de 60Ω.m caractéristiques d'un milieu saturé d'eaux contaminées.

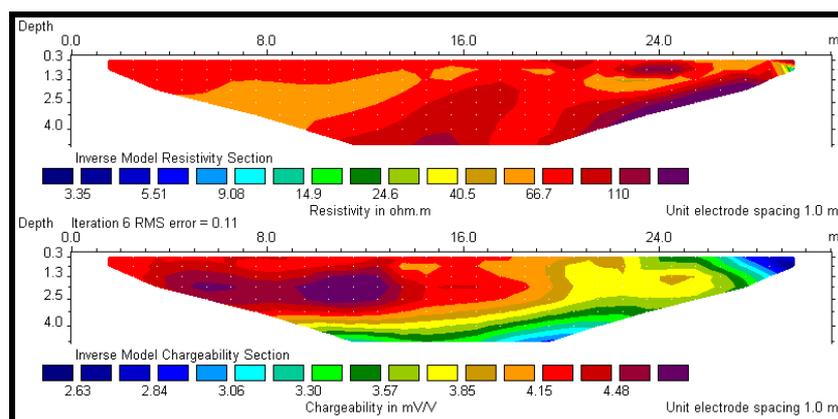


Figure 3- Ambivy, modèle 2D de résistivité et de chargeabilité

Le modèle 3D présenté, ici, en six niveaux différents de 0 à plus de 4m montre une infiltration de lixiviat polluant, correspondant aux valeurs de résistivité de 45 à 50Ω.m, observée principalement sur la première carte de 0 à 0,5m.

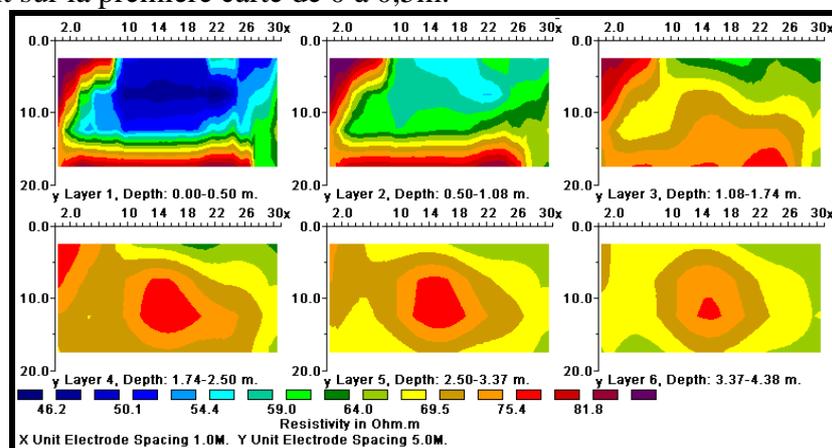


Figure 4 Ambivy, modèle 3D de résistivité

Jirama Ambohimambola

Des stations de mesures électriques ont été implantées sur un terrain marécageux à proximité de la fosse de décharges de résidus d'hydrocarbures de la Centrale thermique de la Société JIRAMA à Ambohimambola.



Photo 2- Centrale thermique JIRAMA, le site de mesures

On est en présence d'un sol tourbeux, conducteur et, normalement moins polarisable. On peut conclure, toutefois, à l'observation de ces coupes, que l'infiltration des hydrocarbures a eu pour effet d'accroître les résistivités, 90 à 160Ω.m, de l'aquifère et les temps de décharge du sol, 7 à 11ms. Ces effets attestent la contamination de ce site et dont les infiltrations commencent à polluer la nappe d'eau souterraine.

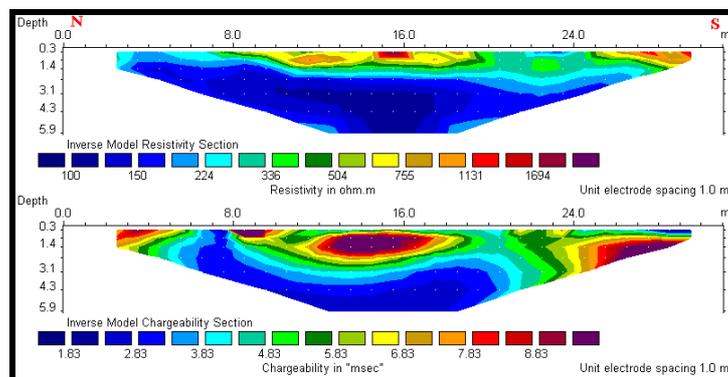


Figure 5- Centrale thermique Jirama, modèle 2D de résistivité et de chargeabilité

Une contamination chimique de l'aquifère et du sol par les acides organiques issus de la dégradation des hydrocarbures en est certainement la cause.



Photo 3- Ambohimambola, le site de mesures

Une autre station est implantée au Nord-Ouest de l'usine PAPMAD, au Sud de la Centrale thermique de la JIRAMA. Quatre panneaux électriques ont été réalisés dans ce secteur, les figures suivantes présentent les résultats obtenus.

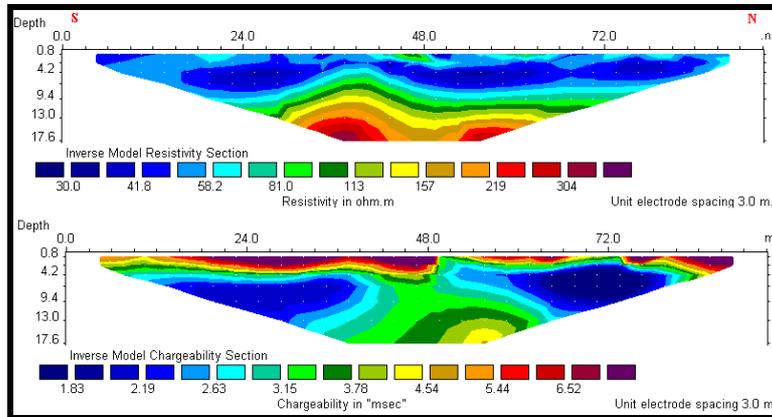


Figure 6- Ambohimambola, modèles 2D de résistivité et de chargeabilité

La pollution de l'aquifère observée se rapporte directement aux rejets de l'usine PAPMAD. On voit nettement apparaître une nappe polluante conductrice, de 30 à 50Ω.m, tout le long du profil électrique.

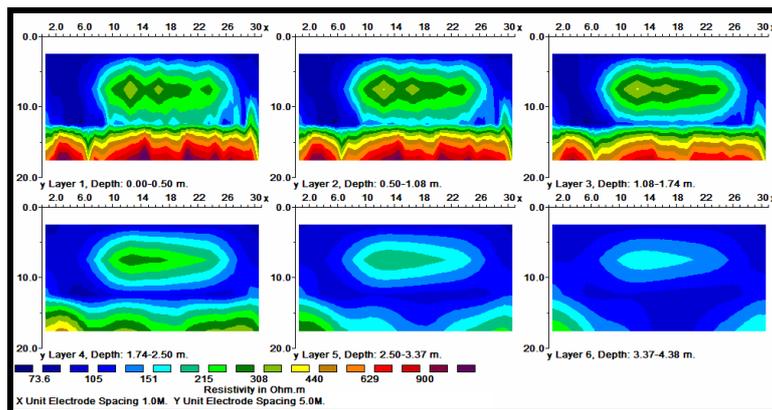


Figure 7- Ambohimambola, modèle 3D de résistivité

Les modèles 3D montrent également les effets de la contamination de l'aquifère jusqu'à près de 2,50m de profondeur. Cependant, il apparaît au vu des valeurs des résistivités observées, 70 à 100Ω.m, plus élevées que celles obtenues par le panneau, que les rejets de la Centrale thermique de JIRAMA sont venus s'ajouter à ceux de PAPMAD en cette station.

Cela peut se voir dans le modèle de chargeabilité avec ces faibles valeurs, 2 à 3,5msec de chargeabilité, qui correspondent à une formation plus sableuse et donc aquifère.

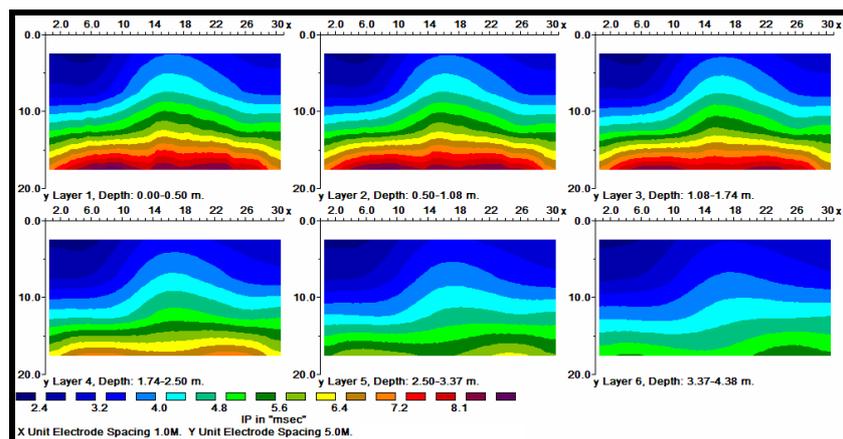


Figure 8- Ambohimambola, modèle 3D de chargeabilité

Les résultats de la géophysique peuvent se résumer dans le tableau suivant, en ce qui concerne, l'état actuel de la pollution du sous-sol des sites étudiés.

Tableau 1- Récapitulation des états du sous-sol

Nombre station	Localisation	Sites intéressés	Etat pollution
1	Ampandroana-Ambodirano Ivato	Madgabest	Oui
8	Cité Barès – Ambodirano Ivato	Unicom	
12	Andralanitra-Kianja	Andralanitra	Oui
16	Ambohimpeno	Papmad	Oui
3	Ambohimambola	Centrale Jirama	Oui
1	Ampitatafika	Rive gauche Sisaony	Non
1	Ambodimita	Station pompage	Non
2	Ankadindravola	Glory-Sovema	Non
1	Anosipatrana	Abattoir	Oui
3	Andraharo	Usine Cote Sud	Oui
2	Tanjombato	Pont	Non

Hydrochimie

Les levés peuvent être divisés en deux groupes : une première campagne de mesures et de prélèvements visant la caractérisation des eaux de surface et qui a été faite parallèlement aux mesures géophysiques et une autre qui a été axée sur les pollutions des ressources en eaux souterraines de la capitale et de son périphérie.

Neuf ions majeurs ont été analysés : sulfate, chlorure, nitrite, nitrate et bicarbonate, azote ammoniacale, calcium, magnésium et fer total.

Les teneurs en **sulfate (SO₄⁻⁻)** qui varient de 0 à 5,5 mg/l font ressortir la faible minéralisation de la zone d'étude, mis à part quelques points d'eau (Ambohipo 10,875 mg/l, Ambohibato 14,41 mg/l, Ambodimita 16,241 mg/l, Tanjombato 17,13 mg/l). Elles restent largement dans le domaine de potabilité.

Habituellement, la teneur en **chlorure Cl⁻** des eaux naturelles est inférieure à 50 mg/l. Les valeurs élevées correspondent aux zones non industrielles peuplées (Itaosy 63,9 mg/l, Androndra 65,68 mg/l, Anosipatrana 149,1 mg/l).

Le puits est un milieu aérobie favorable aux bactéries et facilite le passage d'une forme à une autre entre les éléments azotés. Naturellement, ces éléments sont à faibles teneurs sauf si le terrain traversé en est infesté. Leur présence favorise la forme ainsi que la quantité des cortèges azotés.

Comme le **nitrite (NO₂⁻)** est une forme intermédiaire, sa teneur par rapport à celui du nitrate est faible. Trois puits présentent des eaux avec des valeurs hors norme, Andoharanofotsy 0,132 mg/l, Itaosy 0,141 mg/l et Ankaditoho 0,33 mg/l.

Cas identique pour le **nitrate (NO₃⁻)** relativement modéré, sa valeur ne dépasse pas le cap du 25 mg/l. La teneur en **azote ammoniacal (NH₄⁺)**, paraît excessive : Sud Ambohipo 0,68 mg/l, Ravitoto 0,86 mg/l, Andoharanofotsy 1,24 mg/l, Tanjombato 1,5 mg/l, Ankaditoho 1,62 mg/l). Malgré de fortes teneurs à Sud Ambohipo (153,72 mg/l) et à Itaosy (320,86 mg/l), le **bicarbonate (HCO₃⁻)** se trouve en quantité raisonnable pour tous les sites échantillonnés. La faible teneur en calcium (**Ca⁺⁺**) des eaux souterraines des Hautes Terres se confirme, sauf pour Itaosy où nous avons observé une anomalie : 88 mg/l.

Tableau 2- Résultats des analyses chimiques

Sites	Id.	Anions					Cations			
		SO ₄ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ Mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Fer tot mg/l
Ambatomaro	Rés	0	22,01	0,016	18,805	29,28	0	9,6	0,486	0,15
Ampandroana	P	2,156	0,50	0,007	6,928	10,98	0	1,6	0,243	trace
Andoharanofotsy	Rés	2,413	37,28	0,132	1,590	9,76	1,24	3,6	21,870	0,04
Mandrosoa Ivato	P	5,401	0,30	0,003	4,160	9,76	0	2,0	0,243	0
Manjaka	P	0	30,17	0,020	23,231	12,20	0	7,6	1,701	0
Miadampahonina	P	4,134	1,95	0	6,867	10,98	0	5,6	0,486	2,75
Tanjombato	P	17,127	2,84	0,053	3,863	30,50	1,5	43,6	15,309	0,08
Ambatolampy	P	0	0,3	0,02	23,452	8,54	0	3,2	1,701	0,03
Ambodimita	P	16,241	1,55	0,010	4,594	19,52	0,02	27,2	4,860	0
Ambohibato	P	14,410	5,33	0	0,944	57,34	0,06	12,4	5,346	0,06
Androndra	P	0	65,68	0,079		45,14	0	21,2	5,346	0
Ankaditoho	P	5,518	72,78	0,330	3,894	17,08	1,62	20,8	16,038	0
Anosipatrana	P	4,141	149,10	0,066	11,939	70,76	0	52,8	106,920	0
Itaosy	P	0	63,90	0,141	24,576	320,86	0	88,0	8,748	0,04
Ivandy	P	1,966	0,25	0,003	22,456	21,96	0	7,6	1,701	0,15
Sud Ambohipo	P	10,785	8,88	0	0	153,72	0,68	35,2	6,075	6,00
Ravitoto	Rés	1,197	8,88	0	1,506	7,32	0,86	1,6	3,645	0,10
Val. lim de potabilité		250	250	0.1	50		0.5	200	30	0.3

I. : Identification **P** : Puits **Rés** : Résurgence

La teneur en **magnésium (Mg⁺⁺)**, parallèlement avec celle du sulfate est variable. Par rapport à la norme de potabilité, le puits d'Anosipatrana présente une teneur excédentaire. Le **fer (Fer tot)**, un des oligo-éléments indispensables à l'organisme humain, est parmi les éléments métalliques les plus fréquemment rencontrés dans l'eau, et l'un des rares. Il se présente sous de faible dose dans les eaux de ces puits.

Les dix sept sites ont aussi fait l'objet d'une analyse chimique en métaux lourds : plomb et chrome. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 3- Résultats des analyses des métaux lourds

Sites	Id	Pb (mg/l)	Cr (mg/l)
Ambatomaro	Rés	2,33	0,34
Ampandroana	P	0	0,22
Andoharanofofotsy	Rés	0	0,25
Mandrosoa Ivato	P	0,26	0,62
Manjaka	P	0	0,04
Miadampahonina	P	2,07	0,12
Tanjombato	P	0	0
Ambatolampy	P	1,89	0,06
Ambodimita	P	1,35	0,08
Ambohibato	P	0	0
Andondra	P	0	0,22
Ankaditoho	P	4,13	0
Anosipatrana	P	3,21	0,23
Itaosy	P	0	0,25
Ivandry	P	0	0
Sud Ambohipo	P	0	0,09
Ravi toto	Rés	4,27	0,22
Valeurs lim. de potabilité		0.05	0.02

Id. : Identification

Quelques sites ont des teneurs très fortes, les valeurs maximales observées sont de 83 fois supérieures à la norme pour le plomb à Ankaditoho : 4,13 mg/l et de 31 fois supérieures pour le chrome à Mandrosoa Ivato. Dans la nappe de plaine, le plomb est quasiment absent mais les résultats montrent la présence du chrome sous des teneurs plus ou moins notables.

Conclusion

Du point de vue géophysique, les modèles 2D interprétés et intégrés dans les contextes géologique et hydrogéologique, montrent pratiquement tous des traces certaines de pollution chimique et biologique, fonction du type de rejet.

Les mesures de résistivité par la méthode électromagnétique TEM (*Transient Electromagnetic*) commenceront cette année et compléteront ces résultats. On sait que cette méthode est très sensible aux niveaux conducteurs et les lentilles de pollution, généralement, de faibles valeurs de résistivité, doivent donc être repérées.

Pour le moment, d'après nos observations sur le terrain et d'après les résultats des analyses, les sites "pollués" restent très localisés et ponctuels et sont étroitement liés aux conditions environnementales immédiates aux sites notamment une contamination industrielle : par le passage dans un collecteur d'eaux usées pour Miadampahonina Ambohijanahary; par la présence de marais d'épuration des rejets de l'usine à Ambatomaro; par la proximité d'une zone industrielle à Mandrosoa Ivato et une contamination domestique : par lessivage des déchets des zones d'habitation en amont à Ambodimita et Anosipatrana ; par la présence d'un passage de collecteur d'eaux usées pour Ankaditoho Soanierana; par la présence d'un marais collecteur des eaux d'infiltration contaminées par les habitations en amont : Ambatolampy Antehiroka et enfin, par la proximité du marais d'épuration de la décharge d'ordures pour Ravitoto.

La mobilité médiocre du plomb, renforcée par la présence de matières organiques ainsi que l'acidité faible du milieu pourraient favoriser la concentration de ce métal en ces points.

Les mêmes stations seront réoccupées cette année dans le but de voir si le phénomène persiste ou disparaît après cette saison des pluies de novembre à avril. Bien que préliminaires, ces premiers résultats sont prometteurs. La présence effective de contamination partielle du sous-sol et des ressources en eau souterraine de la plaine est mise en évidence, qu'elles soient d'origines domestiques ou industrielles. La mobilité de ces polluants semble être faible et une investigation plus poussée doit être menée pour confirmer ces premiers acquis justifiant, par-là, tout l'intérêt du projet.

Références

- Albouy-Y., Andrieux-P., Rakotondrasoa-G., Ritz-M., Descloitres-M., Join J.L., Rasolomanana-E., 2001. Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM soundings, three case histories. *Journal Ground Water*, VOL. 39,N°1, Jan-Feb 2001, p.87-97
- Aristodemou E., Thomas-Betts A. (2000). DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics* 44, 275–302
- Atekwana E. A., Sauck W. A., Werkema D. (2000), Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics* 44, 167–180.
- Camerlynck C., Robain H., Mechler P. 2001. DC resistivity measurements on cylindrical soil cores. Analytical and numerical calibration of a square quadripole. *Journal of applied geophysics*, (accepté)
- Courteaud M., Robineau B., Join J.L., Rasolomanana E., Coudray J., 1998. Which hydrogeological conceptual model for a young basaltic shield volcano ? Piton de La Fournaise example (Reunion Island, Indian Ocean). *Proceedings XXVII IAH congress, HTE'96*, 7 p.
- Dahlin T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences* 27, 1019–1029
- Dahlin T., Zhou B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays *geophysical prospecting* 52, 379-398
- Dejoux C., (1988), La pollution des eaux continentales africaines. Expérience acquise, situation actuelle et perspective. Edition ORSTOM.