

4. BASE DE DONNEES

4. BASE DE DONNEES

4.1 Conditions existantes d'aménagement de données

4.1.1 Inventaire des puits

Les données sur les puits existants n'ont pas été aménagées, jusqu'à la présente étude, de façon cohérente au sein du MIEM, alors que celui-ci est pratiquement chargé de la compilation de ces données à la centrale. Un certain nombre d'éléments sont pourtant inscrits sur les fichiers d'index (profondeur du puits, niveau de l'eau souterraine, diamètre du tubage, qualité de l'eau, etc.), mais ne contiennent pas de données portant sur le log de forage et sur les résultats de l'essai de pompage. Les puits existants sont repérés sur les cartes topographiques (échelle: 1/100.000).

Au cours des reconnaissances sur terrain, nous avons visité ces puits enregistré dans l'intention de déterminer leur localisation précise, de compléter dans la mesure du possible les renseignements, et de mesurer les niveaux des eaux souterraines en vue de la préparation d'une carte des contours des eaux souterraines.

Le Rapport supplémentaire (1) donne un exemple de l'inventaire des puits qui a été utilisé, durant les premières reconnaissances sur terrain, pour la mise à jour et la collecte des données en ce qui concerne les puits existants. Toutes les données inventoriées de chacun des puits ainsi qu'une carte esquissée du site seront arrangées dans un système de base de données, construit dans le cadre de la présente étude.

4.1.2 Données météorologiques

Pour permettre une compréhension de l'environnement hydrologique, particulièrement de la potentialité de recharge des eaux souterraines, les données météorologiques aux stations prescrites seront sauvegardées et mises à jour périodiquement par le MIEM. La majorité des données météorologiques peuvent être obtenues auprès du Service Météorologique à Antananarivo, mais la procédure systématique de la collecte et de l'aménagement de données n'y est pas encore introduite.

4.2 Introduction d'un système de base de données

4.2.1 Différents systèmes de gestion de bases de données

Le système de gestion de bases de données (SGBD) est un ensemble des programmes permettant la mise en place, l'accès et le contrôle d'une base de données. Dans la conception d'un système, la base de donnée est indépendante de ces programmes et un système de gestion peut embrasser plusieurs bases de données. Les SGBD les plus couramment connus sont les suivants:

- SGBD hiérarchiquesSGBDH
- SGBD en réseau localSGBDRL
- SGBD relationnellesSGBDR

a) Système de gestion de bases de données hiérarchiques (SGBDH)

Dans le SGBDH, les données sont gérées dans l'arborescence constituée de plusieurs sous-répertoires. Chaque sous-répertoire est lié au répertoire principal en amont et reste susceptible d'avoir un ou plusieurs sous-répertoires en aval. Les données vont, à travers l'arborescence, d'amont en aval jusqu'à ce qu'elles atteignent leur destination appropriée. Le système étant supporté par une structure hiérarchique classifiant par ordre d'importance chacune des données, il ne peut s'appliquer qu'à un but bien spécifique.

b) Système de gestion de bases de données en réseau local (SGBDRL)

Dans le SGBDRL, la structuration des données ressemble à celle du SGBDH, la seule différence réside dans sa possibilité que chaque sous-répertoire peut appartenir à la fois à plusieurs répertoires amont et qu'une donnée désirée peut être ainsi recherchée dans différentes sources.

Dans le réseau, les enregistrements sont reliés les uns aux autres par un système complexe qui nécessite sa mise à jour fréquente de façon à se procurer plus de flexibilités par rapport au SGBDH. Faiblesse du SGBDRL: il est souvent difficile de comprendre, de modifier et de reconstruire la structure du système.

c) Systeme de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR)

Le caractère le plus essentiel du SGBDR est que les données peuvent être affichées devant les utilisateurs sous forme de tableaux. Le tableau est constitué de coordonnées: lignes et colonnes. Les lignes correspondent aux enregistrements ou segments de la base de données traditionnelle et les colonnes, quant à elles, représentent les rubriques dans les enregistrements.

Le système permet de créer des liens entre plusieurs tableaux de façon relationnelle pour en produire un autre comportant tous les enregistrements intéressés. Le SGBDR peut être amélioré et renforcé moyennant son langage de programmation bien puissant et concis.

Parmi ces trois différents SGDB, le SGBDR (dBASE III Plus®) s'adopte le plus à la construction de bases de données hydrogéologiques, grâce notamment à sa contrôlabilité d'accès, possibilité d'amélioration des fonctions assignées et de présentation à l'écran.

4.2.2 Matériels et logiciels

Les 3 unités de l'ordinateur personnel ont été remises avec leurs logiciels d'application dans le cadre de la présente étude:

- Ordinateur portatif TOSHIBA J3100
Modèle GX021
(32 bits, disque dur interne 40Mo).... 1 unité
Modèle SL021
(16 bits, disque dur interne 20Mo).... 2 unités
- Imprimante double-mode.....3 unités
- WordPerfect® (traitement de texte version français)
- WordStar Professional® (traitement de texte version anglais)
- Lotus 1-2-3® (Tableur)
- dBASE III Plus® (base de données)

Dans le système, seront également saisies toutes les données nécessaires tant à la planification de développement qu'à la gestion des eaux souterraines.

Les données en entrée concernent l'hydrologie, la météorologie (cours d'eau, pluviométrie, température, humidité, vitesse du vent, etc.), le niveau des eaux souterraines (d'après observations simultanées et continues) et la qualité de l'eau.

Le système de base de données ainsi adopté sera servi de base pour un futur programme de contrôle des ressources en eaux souterraines du Gouvernement malgache.

4.3 Base de données hydrogéologiques

La conception générale de la base de données traitant les éléments hydrogéologiques est renvoyée dans la figure 4.3.1. Le programme utilisé prévoit les fonctions suivantes:

a) Fonction Saisie de données

Les informations et enregistrements qui seront traités dans le système sont comme suit:

Informations venant du dispositif de surveillance:

- Station météorologique
- Station de mesures
- Puits (forage, puits creusé)

Données enregistrées: (enregistrements mensuels et/ou journaliers)

- Pluviométrie
- Débit
- Niveau de l'eau souterraine
- Température
- Evaporation
- Humidité
- Durée d'ensoleillement
- Vitesse du vent

Résultats de l'analyse de la qualité d'eau

Résultats d'essais de pompage

Niveaux d'eaux souterraines

b) Fonction Recherche

Cette fonction permet de rechercher l'ensemble des enregistrements nécessaires dans un champ déterminé.

c) Fonctions Affichage et Impression

Afficher à l'écran et sortie sur l'imprimante.

d) Fonction Carte de localisation

Cette fonction permet d'afficher la localisation de tous les puits et dispositifs de surveillance dans la Zone de l'Etude.

e) Fonction Assistance

Cette fonction est utilisée pour mettre en ordre l'ensemble des enregistrements sur l'écran en mode plein écran.

Pour simplifier la saisie des données, certaines informations telles les noms de l'organisme ou de la station sont traitées en codes particuliers: "station", "agency", "river", "aquifer", "water use", etc.

De plus amples détails sur la manipulation du programme sont renvoyés dans le manuel d'opération préparé à cet effet (Rapport supplémentaire (2), vol.4).

4.4 Opération et entretien

La section hydrogéologique du MIEM n'a pas encore maîtrisé, faute d'expériences, l'exploitation du matériel informatique qui est l'ordinateur personnel. Il est donc recommandé de mettre en place une cellule spécialisée dans ce domaine.

Ce service s'assignera le développement du système pour l'analyse hydrologique et hydrogéologique, la formation du personnel ainsi que la vulgarisation de l'informatique au sein du MIEM.

Figure 4.2.1 Système de Base de données

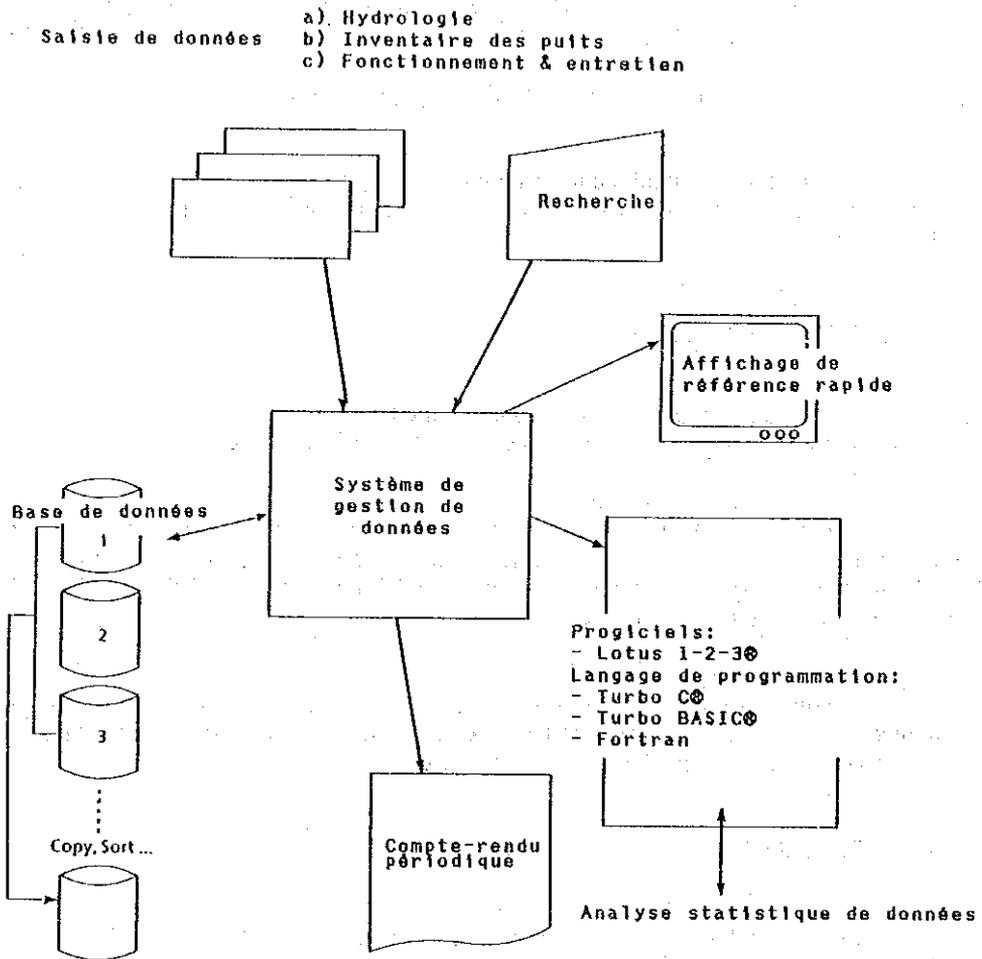
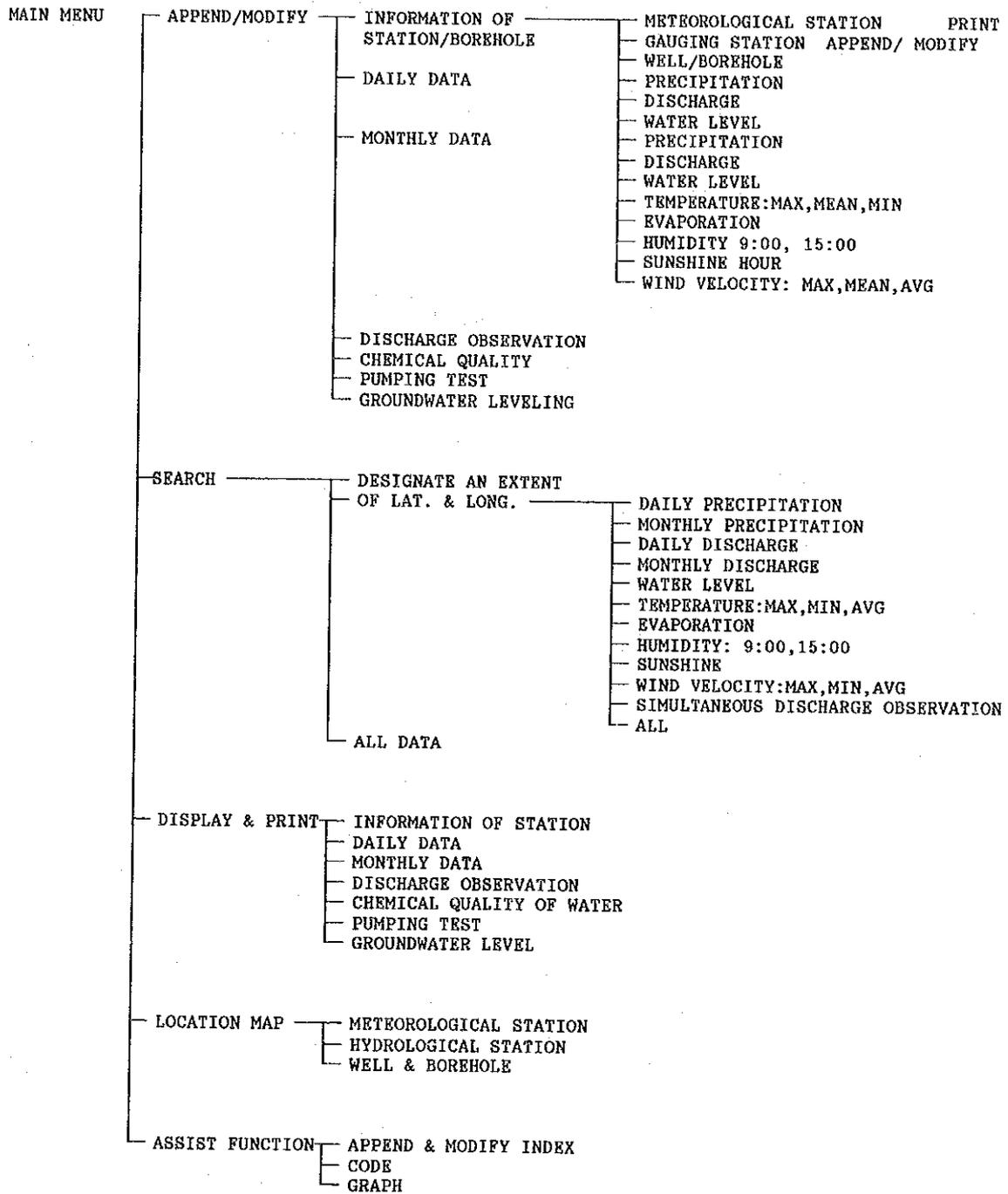


Figure 4.2.2 Schéma fonctionnel de la Base de données hydrogéologique



5. ETUDE DE REHABILITATION

5. ETUDE DE REHABILITAION

L'étude de réhabilitation était prévue initialement pour 9 villages au total. Cependant, le système AEP existant à Tanandava étant maintenu dans un très bon état, n'a pas fait l'objet de notre étude détaillée.

Le village Beroroha a été aussi supprimé dans la liste, du fait que le seul moyen d'accès à ce site est limité à un petit bac qui ne permet pas le transport de nos équipements d'étude et de poids-lourds. Il est ainsi remplacé par Mahaboboka. La liste des villages dont l'équipement existant a été examiné dans le cadre de l'étude de réhabilitation se présente donc comme suit:

- a) *Befandriana*
- b) *Betsioky*
- c) *Andranohinaly*
- d) *Andranovory*
- e) *Sakaraha*
- f) *Ankazoabo*
- g) *Bereketa*
- h) *Mahaboboka* (remplaçant Beroroha)

Les travaux-pilotes de réhabilitation ont été effectués à Befandriana.

5.1 Résultats

Ci-dessous, nous avons inscrit en récapitulation les résultats que nous avons obtenus après l'étude sur les 8 villages:

a) Befandriana

a-1) Puits

Les conditions actuelles du forage sont très différentes de celles enregistrées auparavant:

Rubrique	Actuelles	Enregistrées
Profondeur du forage	64m	36m
Diamètre du tubage	6" 4" 3" téléscopique	6"
Niveau statique Eau	12,6m B.G.S	25,0m B.G.S
Débit de pompage	25 à 30l/mn.	233l/mn.

Travaux de réhabilitation effectués:

- Démontage des tuyaux d'exhaure;
- Démoulage et pompage par air lift répétés durant quelques heures;
- Brossage à l'aide d'une brosse métallique (cette opération a été inutile, le diamètre du tubage ayant devenu plus étroit à la position de la crépine.

La production n'a pas pu s'améliorer, malgré le démoulage et le soufflage. Son débit maximal est inférieur à 30l/mn.

a-2) Autres équipements

- Réservoir élevé: Un réservoir cylindrique en acier (21m³, 3m de haut depuis le niveau de sol) peut être encore exploité d'ici plusieurs années. Les problèmes mineurs sont: une petite quantité de fuite depuis le joint et un clapet endommagé à la conduite de sortie.
- Robinet public: Une colonne d'alimentation avec un robinet, installée près du réservoir, est détériorée depuis bien des années.
- Réservoir: Réservoir construit en briques (dimensions: Larg.1,2m x Long.6m x Haut.0,7m) ne peut plus être utilisé, en raison de son parement en mortier dépouillé et de l'inexistence d'un système de vidage.
- Pompe motorisée: Le moteur usé était déjà démonté et une pompe neuve est nécessaire.
- Groupe électrogène: Il ne peut pas être mis en service, sans être remis en état et réparation.
- Abri du groupe électrogène: Vieux shed construit en tôle de zinc.

b) Betsioky

b-1) Puits et système de pompage

Les conditions suivantes ont été constatées lors du démontage des tuyaux d'exhaure, caissons et crépine 3".

- Profondeur du puits: 90m
- Diamètres et positions des crépines:
6"... 75,75~79,75m 3"... 79,75~89,75m
- Niveau statique d'eau: 59,35m B.G.S
- Débit: 144l/mn.
- Rabattement au pompage de 144l/mn.: 10m
- Qualité de l'eau: CE 2.800 pH 7,0
- Cylindre du moteur: Détérioré
- Moteur pour la pompe: Usé et enlevé
- Crépine (3", type Johnson): Remplie de boues

b-2) Autres équipements

- Réservoir: Résevoir cylindrique en acier (16m³, 2,2m de haut). Son joint devra être scellé pour éviter la fuite.
- Tuyaux de distribution: Les tuyaux en PVC sont détériorés et la conduite d'adduction d'eau est à renouveler.
- Bac de robinet: Il nous semble qu'il est déjà usé et qu'il vaudrait mieux le reconstruire.

Partant de ce constat, il est recommandé de remplacer l'ensemble des infrastructures, exception faite du réservoir d'eau exploitable. En ce qui concerne le puits de forage, les résultats du sondage électrique mettent en relief qu'un forage à une profondeur de 150m pourra produire un débit plus important avec une meilleure qualité d'eau.

c) Andranohinaly

Le système AEP existant de ce village n'est pas mis en service depuis 1975. Il comprend les équipements suivants:

- Réservoir: Réservoir cylindrique en acier (env. 11m³)
- Le bac, près du réservoir, est muni de 3 robinets
- Puits: Profondeur 220m, niveau statique d'eau 207m, tubage 6" avec une pompe cylindrique motorisée.

Le réservoir d'eau ainsi que le bac de robinet nous semblent en bon état pour la future utilisation, mais le système de pompage n'est pas réparable. La productivité du puits n'a pas pu être confirmée, le puits ayant été obstrué par pierres, jetées avant l'essai de pompage.

Nous avons pu constater, lors de notre deuxième visite au village, que le couvercle soudé du puit a été cassé et la profondeur diminuée à 209m (pas de variation du niveau d'eau). Un nouveau Puits devra être construit au moment de la mise en oeuvre.

d) Andranovory

d-1) Puits

Le puits, réalisé en 1964, n'est pas exploité depuis 1984, dû aux problèmes de piston et de moteur. Sa profondeur est de 136m, avec une capacité de 40l/mn. Le niveau statique d'eau se situe à 116m.

Au commencement du démoulage et du pompage par air lift, l'eau n'est sortie qu'en très faible quantité, mais elle a atteint 40l/mn. quelque temps après. L'essai de pompage, effectué par une pompe immergée a confirmé que sa productivité constante est de 40l/mn. Cependant, la plupart des crépines 3" ayant été laissées au fond du puits lors des travaux de démontage, la réhabilitation ne sera plus faisable.

d-2) Autres équipements

- Réservoir: Le réservoir cylindrique en acier (env. 15m³) est encore utilisable, alors que la fondation en ciment, actuellement fissurée, est à reconstruire.
- Bac de robinet: Il n'existe qu'un bac près du réservoir, donc insuffisant pour faire face aux besoins des villageois.

e) Sakaraha

Le système AEP existant dans cette ville comprend; 1 source d'eau (puits), 2 réservoirs élevés, 16 robinets et la conduite d'adduction dont la longueur totalise plus de 1.500m. Ces équipements ne sont plus en état de servir depuis de longues années, en raison de la pompe et de la conduite d'adduction détériorées.

e-1) Puits

- Profondeur: 30,8m (32m sur le enregistrement existant)
- Diamètre du tubage: 6"
- Niveau statique d'eau: 10,66m B.G.S (10,35m)
- Débit avant développement: 100l/mn.
- Débit après développement: 144l/mn.
- Rabattement: 10,97m (débit antérieur de la pompe était de 566l/mn.)

e-2) Autres équipements

- Moteur diesel pour la pompe cylindrique: Usé
- Réservoir élevé No.1, tout près de la source: 24,6m³, 6m de haut. Cylindrique en acier, ce réservoir présente beaucoup de fuites à partir du joint, et sa réparation s'avère difficile.
- Réservoir élevé No.2, situé à 1km de la source: 10m³ approx. Cylindrique en acier. Sa hauteur se situe à 4m au-dessus du niveau du sol (le niveau du sol y est plus haut de 3,60m par rapport à celui du réservoir No.1). La conduite reliant ce réservoir à la source d'eau est détériorée.

- Conduite d'adduction d'eau et robinets: L'ensemble des robinets sont cassés et abandonnés. Les conduites de distribution et de distribution jusqu'au réservoir No.2 sont détériorées et/ou perdues.

f) Ankazoabo

Le système AEP existant de la ville d'Ankazoabo consiste en 5 robinets et en conduite d'adduction d'une longueur totalisant plus de 1.500m. Ces équipements ne fonctionnent pas depuis de longues années, de même qu'à Sakaraha, en raison de la pompe et de la conduite d'adduction détériorées.

f-1) Puits

- Profondeur: 27,25m (31m sur l'enregistrement)
- Niveau statique d'eau: 12,36m (5m)
- Débit: max. 80l/mn. (120l/mn.)
- Rabattement au pompage de 50l/mn.: 0,94m

Nous avons tenté, pour une durée de plus de 3 heures, de développer le puits en employant la méthode démoulage/soufflage. Au début du démoulage, une faible quantité d'eau boueuse (40~50l/mn.) est d'abord sortie, mais le débit a ensuite augmenté progressivement pour aboutir à 80l/mn. en eau propre.

Par contre, le brossage n'a pas été aussi efficace pour améliorer le débit, étant donné qu'une plus petite crépine au-dessous du tuyau d'exhaure a été laissée au fond du trou lors des travaux de démontage.

f-2) Autres équipements

- Réservoir élevé: Réservoir cylindrique en acier de grande dimension d'une capacité d'environ 40m³ et d'une hauteur de 3m. Son état est bon, sauf une petite fuite venant du joint.
- Robinets: Tous les robinets, y compris leur bac en béton, ont disparus.
- Conduite d'adduction d'eau: Les tuyaux 2" en PVC sont endommagés, en particulier ceux enterrés à une profondeur insuffisante dans une couche de lias.

g) Bereketa

L'eau, puisée des 2 puits busés par une puissante pompe centrifuge, est envoyée à un réservoir élevé en ciment qui alimente alors 2 emplacements de bac et 12 robinets. Le système de distribution n'était pas en service. L'emplacement des robinets dans le village nous semble peu satisfaisant.

Le plus gros problème de ce système réside dans la faiblesse quantitative de l'eau, surtout en saison sèche.

Les conditions des puits existants sont les suivantes:

Puits	φ	Prof.	Niveau	Productivité
No.1	0,8m	8,27m	7,25m BGS	Epuisé 2 heures après pompage de 45l/mn.
No.2	1,0m	7,92m	7,39m BGS	Epuisé 5 minutes après pompage de 70l/mn.

h) Mahaboboka

Il existe deux puits dans le village. Selon la population villageoise, l'un, équipé d'une pompe à main, n'est pas exploité à cause de sa modeste qualité de l'eau. L'autre est un forage construit il y a plusieurs années et a offert de l'eau d'une qualité meilleure. Celui-ci, déjà recouvert, n'est pas utilisé non plus, peut-être pour son débit limité surtout pendant la saison sèche.

Nous avons introduit une conduite d'air jusqu'au fond du puits (10m B.G.S) dans l'espoir d'enlever la boue et la terre déposées dans le fond et dans la crépine. La conduite d'air a été cependant gênée par une terre épaisse, à la profondeur de 10,2m B.G.S. La récupération ainsi ratée, il faudrait forer pour ce village un nouveau puits.

5.2 Conclusions

Dans ce qui suit, sont décrites en résumé les observations que nous avons obtenues à travers l'étude sur les 8 villages:

5.2.1 Puits

Pour la plupart des puits, la méthode "*cased hole drilling*" (*jetted well, driven well*) est adoptée. La durée d'exploitation des puits réalisés en empruntant cette méthode s'avère normalement plus réduite par rapport à celle que l'on peut attendre des puits forés, étant donné qu'il est difficile, voire impossible d'encaisser par gravier l'espace annulaire autour de la crépine (ex: Befandriana, Betsioky, Andranovory, Ankazoabo et Mahaboboka). De même, la crépine complètement obstruée ou remplie de boue rend difficile ou presque impossible les travaux de réhabilitation. La méthode "*cased hole drilling*" peut, quant à elle, blinder une bonne aquifère peu profonde et, en conséquence, n'offre qu'un débit plus faible (ex: Befandriana).

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, bien des puits existants ne pourront pas être exploités à long terme. Le puits de Sakaraha en est exception, mais, en tous cas, un nouveau puits est à forer dans le futur, la réhabilitation effectuée demeurant insuffisante.

5.2.2 Autres équipements

Les réservoirs d'eau, sauf celui de Sakaraha, pourront être encore utilisés, à condition qu'on les scelle pour arrêter la fuite, tandis que les autres équipements tels que le système de pompage, la conduite d'adduction et le bac de robinet sont pour la plupart à remplacer ou à reconstruire.

5.3 Travaux modèles de réhabilitation

Les travaux modèles de réhabilitation (type D), faisant suite à l'intervention de réhabilitation, ont été réalisés à Befandriana dans le cadre de la Troisième Phase de l'Etude. Les spécifications techniques sont renvoyées en Annexe D.1.

Le programme initial de réhabilitation pour ce village ne portait que sur le renouvellement du système de pompage et sur la reconstruction du bac de robinet détérioré, afin de permettre l'exploitation du puits ainsi récupéré.

Cependant, nous avons été amenés à considérer, après notre étude sur le terrain, que le puits existant ne pourrait plus être remis en état. Un nouveau puits a été ainsi construit à son côté.

L'état comparatif de deux puits se présente comme ci-dessous:

Rubriques	Nouveau puits	Ancien puits
Profondeur	53,0m	64,0m
Diamètre du tubage	6"	6",4" et 3" téléscopique
Méthode de forage	<i>Open hole (rotary)</i>	<i>Cased hole</i>
Débit	300ℓ/mn.	30ℓ/mn.

Les travaux effectués à Befandriana sont les suivants:

- Forage d'un nouveau puits
- Mise en place d'une pompe submersible dans le nouveau puits
- Installation d'un groupe électrogène à moteur diesel (12,5KVA) et construction de son bâti
- Construction d'un bac avec un robinet
- Réparation du réservoir existant (parement mortier, drainage, robinet)
- Nettoyage et réparation (scellement en mastic) du réservoir existant et remplacement de tuyau de sortie et du robinet d'arrêt
- Tuyauterie entre le nouveau puits et le réservoir élevé, y compris la mise en place d'un compteur à eau
- Essai de fonctionnement sur l'ensemble des équipements.

6. EQUIPEMENTS-PILOTES ET LEUR CONTROLE

6. EQUIPEMENTS-PILOTES

La construction de trois équipements-pilotes (types A, B et C) a fait partie de la Troisième Phase de l'Etude.

Un certain nombre de forages réalisés dans la Deuxième Phase ont été aménagés comme source d'eau pour l'équipement-pilote. Les cahiers des charges, imposés aux constructeurs locaux, sont reproduits dans le Rapport supplémentaire (1).

6.1 Equipement-pilote Type A

Ce type du système AEP consiste en un réservoir d'eau élevé, des conduites d'adduction avec distribution et trois bacs à robinet. L'équipement-pilote a été construit à Mahasoà, principale zone résidentielle de Tranokaky, dont la population est estimée à 1.000 habitants.

Les éléments composants de l'équipement sont les suivants:

- Réservoir élevé: En béton armé, 16m³, 2.6m de haut au-dessus du niveau du sol
- Conduite d'adduction: Tuyaux en fer galvanisé, diamètre 48mm, longueur totale 36m
- Bac de robinet: En briques avec parement en mortier, 3 bacs avec 12 robinets
- Abri pour groupe électrogène et stocks: Mur en briques et toiture en fibro-ciment, 18m²
- Puits et pompe submersible motorisée: Profondeur 181m, tubage 6" en FRP, niveau statique d'eau 16,24m, position de la pompe 106m B.G.S.

6.2 Equipement-pilote Type B

Similaire à celui de type A, mais il est doté en outre d'un système de pompage à l'énergie solaire.

Le principal but d'avoir adopté ce système est de faire le suivi du rendement d'une production d'énergie photovoltaïque pour le pompage.

Un système de production d'énergie solaire supposant un investissement très onéreux, son implantation sera nécessairement limitée à des sites où le niveau des eaux souterraines se situe relativement élevé, soit à moins de 50m au-dessous du niveau du sol.

Soahazo a été choisi pour cette expérimentation, du fait que le niveau statique d'eau y est à 36m B.G.S.

Les éléments composants de l'équipement sont les suivants:

- Système de production d'électricité: 18 panneaux solaires inverter 220V-4A
- Système de surveillance: 2 panneaux solaires, débitmètre, instrument de mesure d'énergie solaire
- Réservoir élevé: En béton armé, 10m³. 1,2m de haut au-dessus du niveau du sol
- Bac à robinet: 1 bac muni de 4 robinets, situé à 25m à partir du réservoir élevé
- Bâti de groupe électrogène et de stocks: Mur en briques et toiture en fibro-ciment, 15m²
- Puits et pompe submersible motorisée: Profondeur 76m, tubage 4", niveau statique d'eau 36m, position de la pompe 42m B.G.S.

6.3 Equipement-pilote Type C

Les pompes à main, dont la partie inférieure cylindrique, ont été implantées sur les 16 forages d'essai, avec leur fondation en béton armé.

Quelques unes d'entre elles seront mises en usage temporaire en attendant la future mise en place d'équipement AEP plus performant, alors que les autres sont destinées à l'usage permanent. Non seulement des pompes de fabrication locale, mais aussi un certain nombre de pompes de marque japonaise ont été installées afin de les mettre en parallèle du point de vue durée de vie, maniabilité et difficulté d'entretien.

Les 16 villages où les pompes à main ont été implantées sont les suivants:

Pompes japonaises:

Namaboha, Ampasikibo, Belitsaka, Analamisampy,
Analatelo

Pompes malgaches:

Manoy, Ampoza, Sihanaka, Basibasy, Mangotroka,
Ampihamy, Manombo, Benety, Ankilimalinika,
Monoroka, Analamary

7. EVALUATION SUR LES POTENTIELS DES EAUX SOUTERRAINES

7. EVALUATION SUR LES POTENTIELS DES EAUX SOUTERRAINES

7.1 Analyse du bilan hydrologique

7.1.1 Equation du bilan hydrologique

L'analyse sur le bilan hydrologique des bassins des eaux souterraines a pour but d'estimer la recharge dans les nappes aquifères de façon à mesurer la potentialité que chacune des zones intéressées possède pour le développement de ses eaux souterraines.

a) Analyse du bilan hydrologique de la Zone de l'Etude

Notre analyse portera sur les zones tributaires du Mangoky et de l'Onilahy (à l'intérieur de la Zone de l'Etude), les bassins versants de la Manombo et du Fiherenana, ainsi que sur la zone côtière comprise entre la Manombo et le Mangoky.

Dans l'analyse, l'apport des eaux par les précipitations P est assimilé à la décharge des différents mouvements hydrauliques (évapotranspiration E , recharge des eaux souterraines W et ruissellement O):

$$P = O + E + W \dots\dots\dots(1)$$

L'analyse sur le bilan hydrologique permettra d'obtenir quelques éléments essentiels pour savoir l'importance de la recharge naturelle des eaux souterraines au niveau de la nappe aquifère.

b) Estimation de la recharge des eaux souterraines dans la nappe phréatique

La nappe aquifère peut être alimentée par infiltration des eaux de pluie, de cours d'eau ou d'autres systèmes des eaux souterraines et déchargée par l'émanation de ses eaux vers les cours d'eau, sources d'eau et son aval. Elle peut également s'écouler en fuites dans d'autres nappes.

A part ces facteurs, on doit tenir compte du changement du volume accumulé des eaux dans l'équation du bilan hydrologique:

$$SdH/dt = (Q_1 - Q_2)/F + W \dots\dots\dots(2)$$

- où: SdH : Changement du volume accumulé des eaux souterraines
- S : Coefficient d'accumulation (ou débit spécifique lorsqu'il s'agit d'une nappe phréatique)
- dH : Variation du niveau d'eau
- dt : Augmentation du temps
- $(Q_1 - Q_2)/F$: Ecoulement d'eaux souterraines
- W : Recharge d'eaux souterraines
- F : Zone du Bilan hydrologique

Dans l'affluence d'eaux souterraines Q_1 sont comprises l'affluence à partir de l'amont de la nappe, la recharge du lit fluvial et les fuites d'autres nappes, alors que l'écoulement Q_2 est dû à celui à partir de l'aval de la nappe, à l'infiltration dans les cours d'eau ou sources d'eau et aux fuites dans d'autres nappes. Dans le cas où les eaux souterraines peu profondes sont complexes, la perte par l'évapotranspiration est intégrée dans l'écoulement.

Lorsque le ruissellement superficiel O dans la formule (1) est proportionnel aux précipitations, on peut obtenir la recharge d'eaux souterraines due à l'infiltration de précipitations G de la façon suivante:

$$W = P' - E \dots\dots\dots(3)$$

$$P' = (1 - C_1) * P \dots\dots\dots(4)$$

- où: C_1 : Constante égale au coefficient de ruissellement

Quand il s'agit d'un bassin d'eaux souterraines libres où la proportion entre l'affluence et l'abstraction est peu significative, la formule (2) peut être exprimée autrement:

$$SdH/dt = -Q_2 / F + W \dots\dots\dots(5)$$

Mais cette formule (5) peut être encore modifiée, pour la saison sèche où l'infiltration des précipitations est négligeable:

$$SdH/dt = -Q_2 / F \dots\dots\dots(6)$$

Dans la saison sèche, il est considéré que le niveau d'eau est en fonction linéaire de sa variation:

$$dH/dt = a * H + b \dots\dots\dots(7)$$

- où: H : Niveau d'eau
- a, b : Constantes

Les constantes peuvent être déterminées par l'analyse d'une courbe de régression du niveau d'eau souterraine peu profonde en saison sèche.

L'équation (7) étant remplacée par celle de (6):

$$-Q_2 = S*F*(a*H + b) \dots\dots\dots(8)$$

Si l'équation (8) est substituée à (5), la formule de base pour le bilan d'eaux souterraines peu profondes sera la suivante:

$$SdH/dt = S*(a*H + b) + W \dots\dots\dots(9)$$

7.1.2 Estimation de la recharge pour les nappes aquifères

a) Pour le calcul du bilan hydrologique, en empruntant les équations de (3) à (9), nous avons suivi la procédure que voici:

a. Choisir à partir des relevés existants, le niveau d'eau initial, puis déterminer les paramètres *S*, *C* et *Mdmax*, afin de les insérer dans l'équation.

b. Une fois obtenus *P* et *E* pour chaque étape, calculer *W* de la façon suivante:

$$Mdt = Mdt-1 + P' - E$$

$$W = 0$$

$$W = Mdt - Mdmax \quad (Mdt > Mdmax)$$

$$Mdt = Mdmax \quad (Mdt > Mdmax)$$

où: *Mdt-1*: Volume d'eau dans la zone saturée à l'étape antérieure

Mdt: Volume d'eau dans la zone saturée à l'étape actuelle

c. *dH/dt* est obtenu, lorsque *W* est inséré dans l'équation.

d. La valeur *H* de la prochaine étape est calculée comme *H = H + dH*.

e. A la fin des étapes, le calcul prend fin, ou recommence à partir de l'ordre b.

Le calcul des paramètres *S*, *C* et *Hdmax* se répète jusqu'à ce que le niveau d'eau ainsi calculé se conforme au niveau réel.

b) Calcul de l'analyse de la recharge

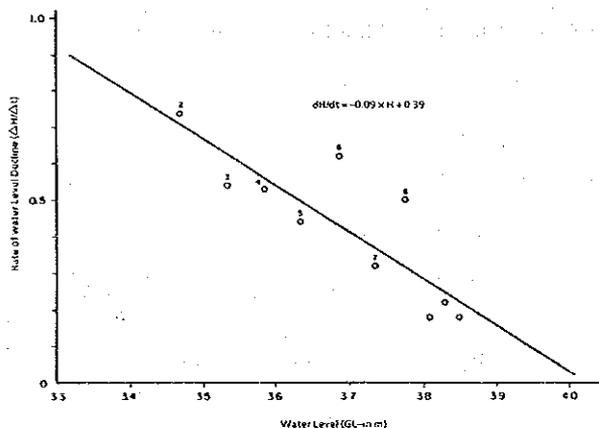
Pour le calcul, nous avons retenu les relevés du niveau d'eau d'Anbatolily. Il est à rappeler pourtant que les conséquences du calcul ne sont pas complètes, du fait que l'observation sur le niveau n'a été effectuée que pour une période de 10 mois, du décembre 1989 au septembre 1990.

b-1) Précipitations et évapotranspiration

Nous avons adopté, pour le calcul, la pluviométrie qui a été mesurée à la station d'Ankaraobato. Quant à l'évapotranspiration, son potentiel est estimé par la méthode de *Thornthwate*.

b-2) Constantes pour l'équation

La relation linéaire entre H et dH/dt peut être telle qu'elle est représentée dans la figure suivante. Les constantes a et b sont obtenues par la méthode des moindres carrés:



$$dH/dt = -0,09 * H + 0,39$$

Cependant, le terme b est modifié à 0,35 par étalonnage à cause du manque de relevés. Cette condition fera bien entendu l'objet de vérification postérieure en tenant compte des résultats d'observation supplémentaire.

b-3) Résultats

Les résultats concernant le calcul du bilan hydrologique d'eaux souterraines peu profondes sont donnés dans le tableau 7.1.1, dans lequel est établie la conformité entre les niveaux calculés et réels (Fig.7.1.1). Les paramètres déterminés dans la procédure ci-dessus sont les suivants:

- Coefficient d'emmagasinage
- Coefficient de ruissellement
- Capacité de rétention d'eau

Le bilan hydrologique est enfin estimé comme suit:

- Précipitations525mm (100%)
- Ruissellement105mm (20%)
- Evapotranspiration325mm (62%)
- Recharge d'eaux souterraines ...94mm (18%)

7.1.3 Bilan hydrologique dans les bassins

Le bilan hydrologique est calculé, pour chacun des bassins, de façon approximative en empruntant les formules de (1) à (4).

Bassins	A(km ²)	P(mm)	ET(mm)	O(mm)	W(mm)
Manombo	508	760	494	152	114
Fiherenana	6.755	780	507	156	117
Sakanavaka	3.070	750	488	150	113
Isahena	1.870	810	527	162	122
Malio	2.040	870	566	174	131
Sakandory	730	750	488	150	113
Taheza	1.600	770	5.501	154	116

Les précipitations de la zone sont calculées selon l'isohyète annuelle, et l'évapotranspiration et le ruissellement annuel selon le ratio mentionné dans la section 3.3 (ex: 65% pour l'évapotranspiration et 20% pour le ruissellement annuel).

Par ailleurs, les résultats de la mesure de débit sont également pris en considération en tant qu'écoulement de base dans l'estimation du potentiel de recharge.

Le tableau ci-dessous reproduit les résultats:

(unité: $\text{l}/\text{mn.}/\text{km}^2$)

Bassins	A (km^2)	Écoulement de base	Bilan hydrologique
Manombo	508	150	217
Fiherenana	6.755	30	223
Sakanabaka	3.070	360	214
Isahena	1.870	144	231
Malio	2.040	378	248
Sakandory	730	66	214
Taheza	1.600	924	220

Les résultats des mesures spot sont considérés comme les potentiels de recharge d'eaux souterraines. De ce bilan hydrologique, il ressort que la recharge des bassins étudiés se situe aux environs de 100 à 300 $\text{l}/\text{mn.}/\text{km}^2$, mais ceci sans compter les conditions hydrogéologiques locales.

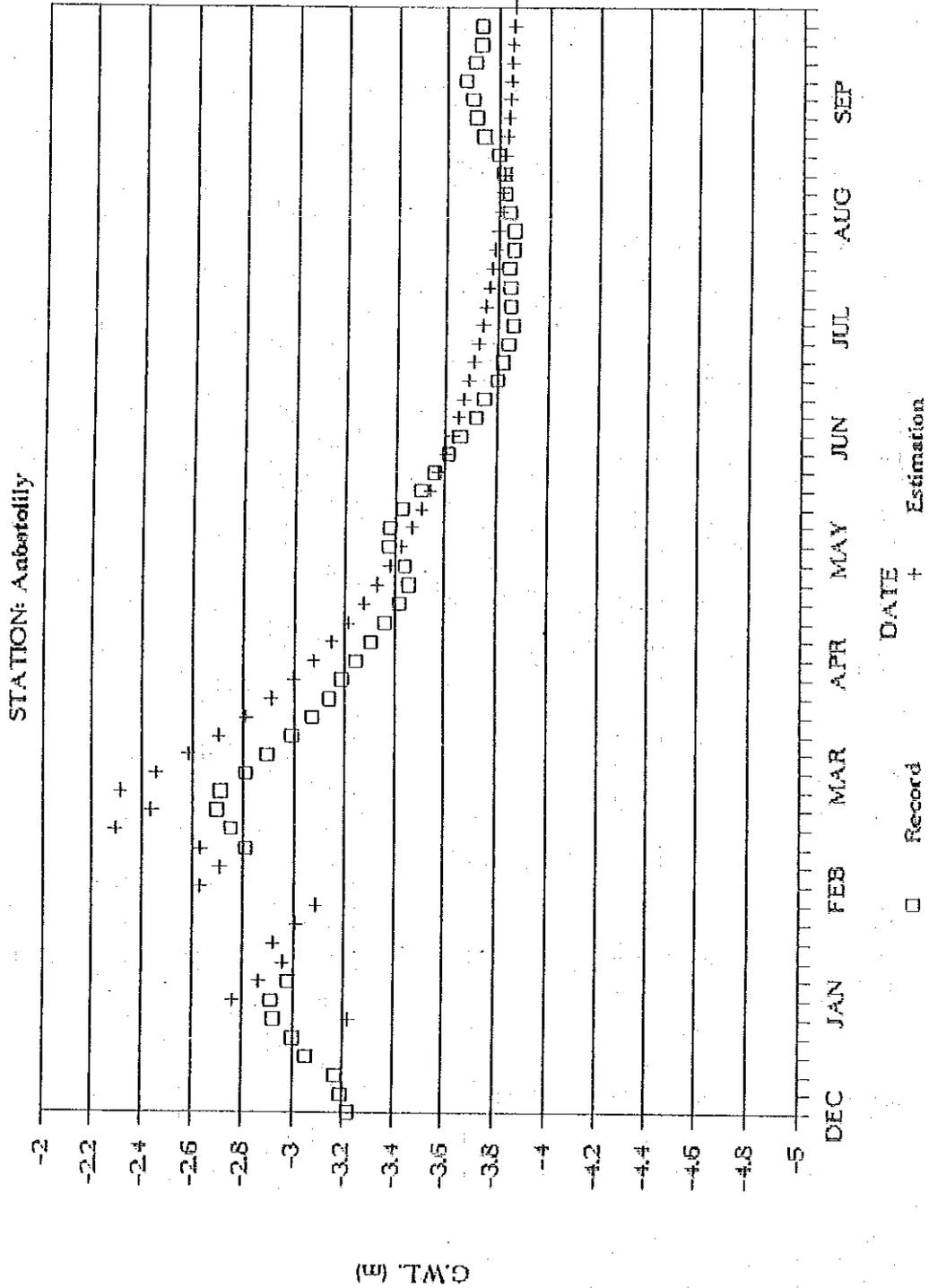
Tableau 7.1.1 Calcul du bilan hydrologique

1. Niveau d'eau initial: 3,22
 2. Coefficient de ruissellement: 0,2 6. Coefficient de décroissance
 3. Mdmax: 10 α : -0,09
 4. Md initial: 10 b: 0,35
 5. Coefficient d'emmagement: 0,04

STEP	MONTH	P	E	P*C	M'	W	dif	H	H	M''	M
0								3.22		10	10
1	DEC	60	22	48	36	26	-0.58	2.630		10	10
2		10.6	22	8.48	-3.52	0	0.113	2.743		-3.52	0
3		15.4	22	12.32	-9.68	0	0.103	2.846		-9.68	0
4		47.6	22	38.08	16.08	6.08	-0.05	2.788		10	10
5		0	22	0	-12	0	0.099	2.887		-12	0
6		1.1	26.4	0.88	-25.5	0	0.090	2.977		-25.5	0
7	JAN	73.1	22	58.48	36.48	26.48	-0.57	2.397		10	10
8		29.7	22	23.76	11.76	1.76	0.090	2.487		10	10
9		39	22	31.2	19.2	9.2	-0.10	2.383		10	10
10		55.6	22	44.48	32.48	22.48	-0.42	1.957		10	10
11		0	22	0	-12	0	0.173	2.131		-12	0
12		61.3	26.4	49.04	22.64	12.64	-0.15	1.973		10	10
13	FEB	0	20.5	0	-10.5	0	0.172	2.145		-10.5	0
14		36.2	20.5	28.96	8.46	0	0.156	2.302		8.46	8.46
15		2.2	20.5	1.76	-10.2	0	0.142	2.445		-10.2	0
16		0	20.5	0	-20.5	0	0.129	2.575		-20.5	0
17		13.5	20.5	10.8	-9.7	0	0.118	2.693		-9.7	0
18		0	12.3	0	-12.3	0	0.107	2.801		-12.3	0
19	MAR	0	19	0	-19	0	0.097	2.899		-19	0
20		0	19	0	-19	0	0.089	2.988		-19	0
21		0	19	0	-19	0	0.081	3.069		-19	0
22		0	19	0	-19	0	0.073	3.142		-19	0
23		0	19	0	-19	0	0.067	3.210		-19	0
24		8.2	22.8	6.56	-16.2	0	0.061	3.271		-16.2	0
25	APR	0	15.5	0	-15.5	0	0.055	3.326		-15.5	0
26		0	15.5	0	-15.5	0	0.050	3.377		-15.5	0
27		0	15.5	0	-15.5	0	0.046	3.423		-15.5	0
28		7.2	15.5	5.76	-9.74	0	0.041	3.465		-9.74	0
29		17.1	15.5	13.68	-1.82	0	0.038	3.503		-1.82	0
30		6.9	15.5	5.52	-9.98	0	0.034	3.538		-9.98	0
31	MAY	10	12.5	8	-4.5	0	0.031	3.569		-4.5	0
32		0	12.5	0	-12.5	0	0.028	3.598		-12.5	0
33		0	12.5	0	-12.5	0	0.026	3.624		-12.5	0
34		0	12.5	0	-12.5	0	0.023	3.648		-12.5	0
35		0	12.5	0	-12.5	0	0.021	3.669		-12.5	0
36		0	15	0	-15	0	0.019	3.689		-15	0
37	JUN	0	10.5	0	-10.5	0	0.017	3.707		-10.5	0
38		0	10.5	0	-10.5	0	0.016	3.723		-10.5	0
39		0	10.5	0	-10.5	0	0.014	3.738		-10.5	0
40		0	10.5	0	-10.5	0	0.013	3.752		-10.5	0
41		4.4	10.5	3.52	-6.98	0	0.012	3.764		-6.98	0
42		0	10.5	0	-10.5	0	0.011	3.775		-10.5	0
43	JUL	0	11.5	0	-11.5	0	0.010	3.785		-11.5	0
44		0	11.5	0	-11.5	0	0.009	3.795		-11.5	0
45		0	11.5	0	-11.5	0	0.008	3.803		-11.5	0
46		0	11.5	0	-11.5	0	0.007	3.811		-11.5	0
47		0	11.5	0	-11.5	0	0.006	3.818		-11.5	0
48		22.6	13.8	18.08	4.28	0	0.006	3.824		4.28	4.28
49	AUG	0	15.5	0	-11.2	0	0.005	3.830		-11.2	0
50		0	15.5	0	-15.5	0	0.005	3.835		-15.5	0
51		0	15.5	0	-15.5	0	0.004	3.840		-15.5	0
52		0	15.5	0	-15.5	0	0.004	3.844		-15.5	0
53		0	15.5	0	-15.5	0	0.003	3.848		-15.5	0
54		0	18.6	0	-18.6	0	0.003	3.852		-18.6	0
55	SEP	3.7	20.5	2.96	-17.5	0	0.003	3.855		-17.5	0
56		0	20.5	0	-20.5	0	0.002	3.858		-20.5	0
57		0	20.5	0	-20.5	0	0.002	3.861		-20.5	0
58		0	20.5	0	-20.5	0	0.002	3.863		-20.5	0
59		0	20.5	0	-20.5	0	0.002	3.866		-20.5	0
60		0	20.5	0	-20.5	0	0.002	3.868		-20.5	0

P: Précipitations pendant 5 jours
 M: Profondeur maintenue
 E: Evapotranspiration pendant 5 jours
 M': M+PxC-E M'': Valeur convertie avec Md

Figure 7.1.1.1 Bilan hydrologique



7.2 Modèles de simulation d'eaux souterraines

7.2.1 Description de l'analyse

a) Conception de base

Dans le but de mettre en évidence les modèles d'écoulement d'eaux souterraines, la simulation par modèle 2D (bidimensionnel) a été effectuée dans la présente étude. Les eaux souterraines peuvent s'écouler de deux façons: d'abord à travers des ouvertures primaires à l'intérieur des roches, puis dans des ouvertures secondaires réalisées après la formation des roches. Dans ce cas, les conditions d'écoulement diffèrent naturellement de celles dans les matières normales et poreuses. Il est toutefois possible de supposer que le coefficient de conductivité hydraulique pour leur écoulement dans les roches soit semblable à celui dans l'écoulement dans les couches normales:

$$\psi = h \cdot g \dots\dots\dots(1)$$

où, h: Niveau de l'eau souterraine
g: Accélération gravitaire

La distribution de la tête hydraulique dans la section peut être estimée en tenant compte des conditions topographiques et du niveau d'eau souterraine et elle permet de tracer les lignes équipotentielles. Les lignes d'écoulement seront définies par ces lignes équipotentielles, auxquelles l'écoulement d'eau souterraine est perpendiculaire. La carte ainsi établie, appelée la carte "Réseau d'écoulement", sert à la visualisation des conditions d'écoulement des eaux souterraines.

Lorsque deux couches adjacentes montrent différents coefficients de conductivité hydraulique, les lignes équipotentielles ainsi que celles d'écoulement se réfractent à leur frontière. *Hubburt* (1940) a présenté un système d'écoulement des eaux souterraines pour les sections dont le coefficient de conductivité hydraulique est égal (Fig.7.2.1(1)). *Toth* a présenté un modèle mathématique par la formule de *Laprus* pour l'étude du système d'écoulement (Fig.7.2.1(2)).

L'écoulement des eaux souterraines se présente en trois différents systèmes selon la topographie et la géométrie du bassin versant:

- Système régional: dans ce système, l'eau souterraine s'écoulerait à partir de la zone de recharge à un haut bassin versant vers la zone de recharge située dans la vallée;
- Système intermédiaire: l'écoulement a au moins un système local entre leur zone de recharge et de déversoir;

- Système local: l'écoulement est provoqué par la dénivellation des reliefs locaux.

Freeze et Witherspoon(1967) ont mené une analyse numérique sur la distribution de potentiels hydrauliques dans une structure à plusieurs couches dont le coefficient de conductivité hydraulique est différent et présenté 3 modèles d'écoulement:

- Ecoulement dans les couches où le coefficient est élevé en leur niveau inférieur;
- Ecoulement dans les couches homogènes;
- Ecoulement dans les couches où le coefficient est élevé de façon partielle.

b) Potentiel de tête hydraulique et fonctions d'écoulement (Bear, 1979)

Les lignes d'écoulement peuvent être définies comme les courbes tangentes sur tous points au vecteur d'écoulement des eaux souterraines, de telle sorte que sa direction est assimilée à celle de l'écoulement des eaux souterraines. De là, le débit d'un écoulement est stable sans l'interférence d'autres écoulements. L'équation de la ligne d'écoulement est la suivante:

$$q \times ds = 0 \dots\dots\dots(2)$$

où, x : Produit alternant
 ds : Vecteur unité

Dans les coordonnées rectangulaires, cette formule (2) est:

$$q_y \cdot dx - q_x \cdot dy = 0 \text{ (Fig.7.2.1(4))} \dots\dots\dots(3)$$

Si la fonction $\psi = \psi(x,y)$ est définie selon la ligne d'écoulement:

$$d\psi = 0 = \partial\psi/\partial x \cdot dx + \partial\psi/\partial y \cdot dy \dots\dots\dots(4)$$

La formule ci-dessous peut être obtenue par les équations (3) et (4):

$$q_x = 0 = \partial\psi/\partial y \quad q_y = \partial\psi/\partial x \dots\dots\dots(5)$$

ψ constitue la fonction d'écoulement (dimension: L^2/t). Par application de la loi de Darcy:

$$q_x = -K_x \cdot \partial\psi/\partial x \quad q_y = -K_y \cdot \partial\psi/\partial y$$

Ceci permet de vérifier la relation suivante:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \cdot \partial\psi/\partial x = -\partial\psi/\partial y \\ q_y &= -K_y \cdot \partial\psi/\partial y = \partial\psi/\partial x \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

Le débit d'eaux souterraines s'écoulant dans une zone comprise entre les deux lignes d'écoulement peut être alors obtenu de la façon suivante:

$$\Delta Q = \int_{\psi_1}^{\psi_2} d\psi = \psi_2 - \psi_1 \dots\dots\dots(7)$$

Le débit est donc égal à la différence des fonctions aux deux sections.

c) Equations de base

L'équation de base de continuité de l'écoulement stable des eaux souterraines peut être obtenue par une tête hydraulique dans une section bidimensionnelle:

$$\partial/\partial x (K_x \cdot \partial\psi/\partial x) + \partial/\partial y (K_y \cdot \partial\psi/\partial y) = 0 \dots\dots\dots(8)$$

La fonction d'écoulement est donc comme suit (Bear, 1979):

$$\partial/\partial x (1/K_x \cdot \partial\psi/\partial x) + \partial/\partial y (1/K_y \cdot \partial\psi/\partial y) = 0 \dots\dots(9)$$

Dans une condition de *Dirichlet*, la limite est la suivante:

$$\psi = \psi_0 (\Gamma_1) \dots\dots\dots(10)$$

$$\psi = \psi_0 (\Gamma_2) \dots\dots\dots(11)$$

Ici, $\psi_0 (\Gamma_1)$ et $\psi_0 (\Gamma_2)$ représentent respectivement la tête connue dans la limite Γ_1 et la fonction connue dans la limite Γ_2 .

Dans une condition de *Neumann*, la limite est la suivante:

$$g \frac{\partial \psi}{\partial n} = K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \psi}{\partial y} n_y \dots\dots\dots(12)$$

$$g \frac{\partial \psi}{\partial n} = - \frac{\partial \psi}{\partial x} \gamma_x + k_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \gamma_y \dots\dots\dots(13)$$

où, $g \frac{\partial \psi}{\partial n}$: Débit connu (affluence est +) et pente de fonction d'écoulement connue, perpendulaire à la limite

n_x et n_y sont cos des lignes normales à la limite avec $n_x = -\gamma_y$, $n_y = -\gamma_x$ (Fig.7.2.1(6)). Une condition typique à la limite est donnée dans la figure 7.2.1(7) (Friend & Matanga, 1985).

d) Analyse numérique

Dans l'analyse numérique, la méthode de *Finite-Element* (méthode de *Galerkin*) a été adoptée afin de résoudre les équations (8) et (9).

$$\gamma = \gamma = \sum_{j=1}^N \gamma_j W_j(x, y) \dots \dots \dots (14)$$

Ici, W_j est une fonction de base, représentée par un élément triangulaire comme suit:

$$W_j(x, y) = \frac{1}{2\Delta} (a_j + b_j x + c_j y) \dots \dots \dots (15)$$

Δ est la superficie d'un triangle, et a_j , b_j et c_j sont comme suit:

$$\begin{aligned} a_1 &= x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2, & b_1 &= y_2 - y_3, & c_1 &= x_2 - x_3 \\ a_2 &= x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3, & b_2 &= y_3 - y_1, & c_2 &= x_3 - x_1 \\ a_3 &= x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1, & b_3 &= y_1 - y_2, & c_3 &= x_1 - x_2 \end{aligned} \dots \dots (16)$$

x_1 à x_3 ainsi que y_1 à y_3 sont les coordonnées des points de tangence. Dans la méthode de *Galerkin*, on rend nulle la différence produite lorsque les formules (8) et (9) sont remplacées par la solution asymptotique de l'équation (14). Ce faisant, on obtient une formule ci-dessous:

$$[R]\{\gamma\} = \{F\} \dots \dots \dots (17)$$

Les composants de $[R]$ seront comme suit, en ce qui concerne le potentiel et fonction d'écoulement ψ :

$$R_{ij}^{\psi} = \sum \int \int_e (K_x \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y}) d x \times d y \dots \dots (18)$$

$$R_{ij}^{\psi} = \sum \int \int_e (\frac{1}{K_y} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + \frac{1}{K_x} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y}) d x \times d y \dots (19)$$

Σ signifie un élément à ajouter. Les équations (18) et (19) peuvent s'exprimer pour chacun des éléments:

$$R_{ij}^{\psi} = \frac{1}{4\Delta} (C_x b_i b_j + C_y c_i c_j) \delta_{ij}, \quad j = 1, 2, 3 \dots \dots (20)$$

Où, $C_x = K_x$ ou $1/k_y$, $C_y = K_y$ ou $1/k_x$. $\{F\}$ comprend les valeurs de la condition de *Neumann*. Si l'écoulement connu q_n est donné, la formule (12) sera comme suit:

$$F_i^{\psi} = \sum_e q_n \frac{l}{2} \dots \dots \dots (21)$$

où, q_n : Débit vertical à la limite
 l : Longueur de l'élément

Dans la fonction d'écoulement, la formule (13) peut être la suivante:

$$F_i = \frac{\psi_{i+1} - \psi_{i-1}}{2} \dots \dots \dots (22)$$

Ici, $\psi_{i+1} - \psi_{i-1}$ sont les potentiels des points de tangences avoisinant le point i .

7.2.2 Modélisation

a) Sections modélisées

Les figures 7.2.2(1) et 7.2.3(1) montrent les sections qui ont été choisies pour procéder à la simulation par modèle bidimensionnel, les deux sections sont localisées dans la zone littorale.

Les raisons du choix sont les suivantes:

- La plaine côtière constitue la zone la plus sèche dans la Zone de l'Etude;
- Le système de failles de cette zone peut être marqué par sa direction Nord-Sud. Il est donc estimé que ces failles influent sur le système d'écoulement des eaux souterraines.

a-1) Section Andharano~Manombo Atm

La bordure Est constitue un bassin versant de la Manombo. La "Faille de Toliara" est située au centre de la section. La partie Nord de cette faille est composée essentiellement de calcaire poreux ou fissuré et de calcaire marneux de l'Eocène inférieur, alors que la partie Sud comporte des calcaires compacts ou poreux, des calcaires marneux et grès à grains fins ou grossiers intercalés de grès graveleux de l'Eocène moyen et supérieur.

a-2) Section Befandriana~Lac d'Ihotry

La bordure Est constitue un bassin versant de la Befandriana et le niveau du sol s'incline continuellement vers le Lac d'Ihotry. Un certain nombre de failles existent au milieu de la section. Sur le plan géologique, on distingue, de l'amont à l'aval du cours d'eau, les trois groupes de formations (selon les sondages profonds effectués à Befandriana dans les années 1970): les formations y sont constituées essentiellement des sédiments néritiques, mais de différentes périodes: l'Eocène moyen et supérieur, l'Eocène inférieur et le Crétacé supérieur. La composition détaillée est décrite dans le chapitre 3.

b) Conditions de la limite

- Le niveau de l'eau souterraine coïncide avec l'élévation du sol;
- Les limites du fond, de droite et de gauche sont imperméables et;
- Aucun écoulement interrompt les limites.

c) Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique pour les modèles est déterminée par des données collectées sur place et par les résultats de l'essai de pompage. Le tableau 7.2.2 montre les valeurs de conductivité ainsi que les lithofaciès. Les propriétés de nappes aquifères sont décrites dans le chapitre 3.

Il a été supposé 2 différents cas en ce qui concerne la conductivité hydraulique:

Cas 1	L'ensemble des sections étudiées témoignent de la même valeur de conductivité.
Cas 2	Chacune des sections est caractérisée par sa propre valeur de conductivité.

Les combinaisons de la conductivité sont données dans les figures 7.2.2(3) et 7.2.3(3).

d) Résultats et considérations

d-1) Section Andharano-Manombo Atm

Lorsque la section est constituée de formations homogènes et poreuses, l'eau souterraine s'écoule en cas 1. A savoir, elle coule du bassin versant Est vers la RN 9 à l'Ouest. 4 cours intermédiaires sont observables dans l'écoulement régional, convergés surtout au tributaire de la Manombo.

Le cas 2 s'adopte au système des failles à différentes conductivités hydrauliques. Il est clair que l'écoulement régional venant de la partie Est est endigué par la présence des failles. Si la zone de failles est imperméable, tous les écoulements proviennent de la partie Est du système des failles. Ces failles ont d'ailleurs une influence sur les cours intermédiaires localisés autour d'elles.

d-2) Section Befandriana-Lac Ihotry

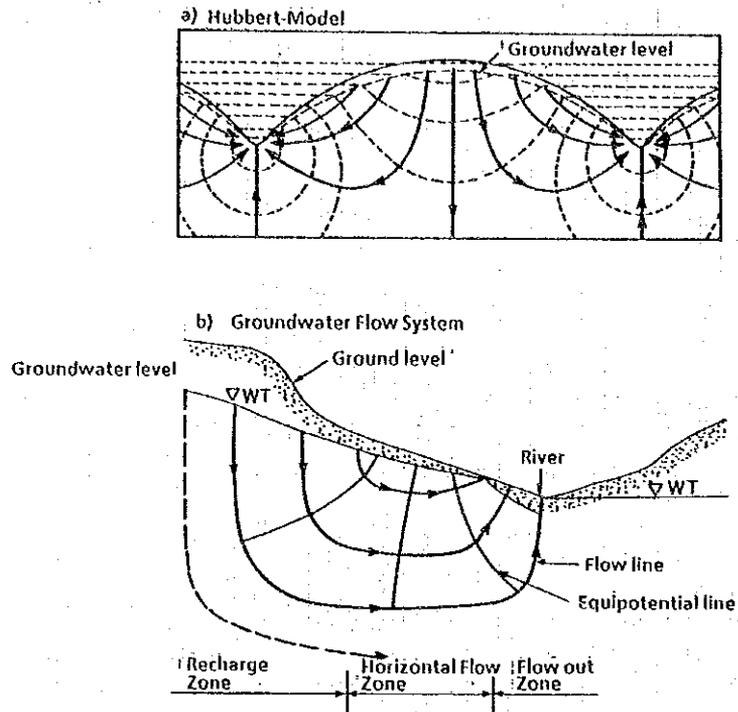
Le cas 1 correspond à l'écoulement dans les nappes homogènes. L'écoulement régional apparaît dans le bassin versant de la zone montagneuse et se dirige vers le Lac Ihotry. 3 écoulements intermédiaires sont constatés dans cette zone montagneuse.

Le cas 2 s'adopte au système des failles à différentes conductivités hydrauliques. L'écoulement régional partant de la partie Est est sans doute endigué par la présence des failles. 2 systèmes d'écoulement intermédiaires se présentent dans le massif montagneux. Le système est actuellement découpé en deux dans la zone montagneuse d'une part et dans la zone plaine d'autre part. Ce phénomène illustre d'ailleurs le puits artésien qu'on trouve à Antanimieva, et à l'Ouest et à l'Est de ce puits, on assiste à 2 failles de direction Nord-Sud. La faille Est est prise en considération dans la section-modèle. Toutefois, la faille Est ne semble pas exercer une influence significative sur le puits d'Antanimieva. En d'autres termes, la faille Ouest joue un rôle important pour endiguer l'écoulement d'eaux souterraines.

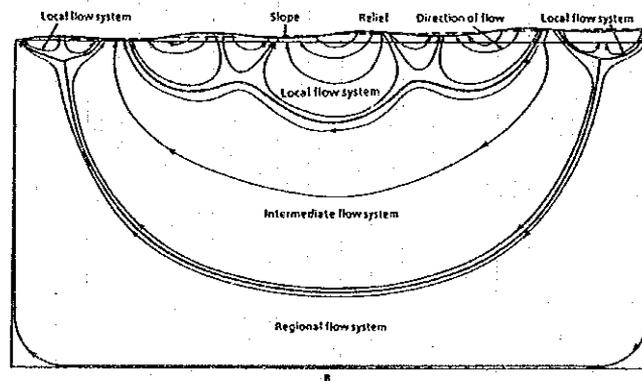
Tableau 7.2.1 Perméabilité hydraulique

Location	T/Jacob(m ² /min)	L(Screen)(m)	K(cm/sec)	Lithofacies
1 Manoy	4.34x10 ⁻²	20	3.6x10 ⁻³	Sandstone(M-C)
2 Ampoza	4.71x10 ⁻²	24	3.3x10 ⁻²	Sandstone(M, M-C)
3 Siharalca	4.32x10 ⁻¹	20	3.6x10 ⁻²	Sandstone(M-C)
4 Basibasy	9.76x10 ⁻³	28	5.8x10 ⁻⁴	Sandy Marl&Sandy Limestone
5 Analatero	----	20	----	Sandy Marl&Sandy Limestone&Limestone
6 Mangotroka	1.14x10 ⁰	24	7.9x10 ⁻²	Sandstone(M-C)
7 Soahazo-1	1.13x10 ⁰	16	1.2x10 ⁻¹	Sandy Marl
8 Soahazo-2	4.69x10 ⁻²	12	6.5x10 ⁻³	Sandstone(M-C)&Sandy Marl
9 Analamisampy	3.20x10 ⁻³	24	2.2x10 ⁻⁴	Sandy Limestone&Sandstone(M)&Sandy Marl
10 Belitsalco	1.08x10 ⁻²	20	9.0x10 ⁻⁴	Sandstone(M&C)&Sandy Marl
11 Ampasikibo	8.71x10 ⁻²	20	7.3x10 ⁻³	Sandy Marl
12 Namabaha	3.10x10 ⁻²	18	2.8x10 ⁻³	Sandstone(M-C)&Sandy Marl&Sandy Limestone
13 Ampihamy	3.45x10 ⁻¹	28	2.1x10 ⁻²	Sandstone(M-C)
14 Ankarabato	1.67x10 ⁻¹	28	9.9x10 ⁻³	Sandstone(M-C&C)&Sandy Marl&Limestone
15 Manombo Atm	2.36x10 ⁰	12	3.3x10 ⁻¹	Sandstone(G-M-C)&Limestone
16 Tsefanolca	1.18x10 ⁻¹	20	9.8x10 ⁻³	Marly Limestone&Sandstone(C)&Limestone
17 Benetsy	2.33x10 ⁻¹	16	2.4x10 ⁻²	Sandstone(C)thire marly Sandstone
18 Ankilimalinika	3.02x10 ⁻¹	20	2.5x10 ⁻²	Sandy Marl&Sandstone(C)
19 Anovoka	----	20	----	Sandstone(C)&Limestone
20 Befoly	----	14+open Lole	----	Limestone
21 Tranokaky	5.05x10 ⁻³	56	1.5x10 ⁻⁴	Basalt&Sandstone(f)
22 Tandrano	8.45x10 ⁻²	24	5.9x10 ⁻³	Sandstone(F-M)
23 Berenty-Betsileo	3.55x10 ⁻³	32	1.8x10 ⁻⁴	Marly Sandstone&Sandstone
24 Maninday	8.23x10 ⁻²	28	4.9x10 ⁻³	Sandstone(G-C)
25 Analamary	5.06x10 ⁻²	36	2.3x10 ⁻³	Sandstone(C-f)
Befaudriana	6.54x10 ⁻¹	16	6.8x10 ⁻²	
Sandstone (7.9x10 ⁻² ~2.3x10 ⁻³) Mean=1.3x10 ⁻²				
Sandy Marl (1.2x10 ⁻¹ ~7.3x10 ⁻³) Mean=3.0x10 ⁻²				
Sandy Marl & Sandstone (2.5x10 ⁻² ~6.5x10 ⁻³) Mean=1.3x10 ⁻²				
Sandstone & Limestone (3.3x10 ⁻¹)				
Sandy Marl & Limestone (9.9x10 ⁻³ ~2.2x10 ⁻⁴) Mean=1.5x10 ⁻³				
Basalt & Sandstone (1.5x10 ⁻⁴)				

Figure 7.2.1 Représentation graphique des différentes théories de simulation

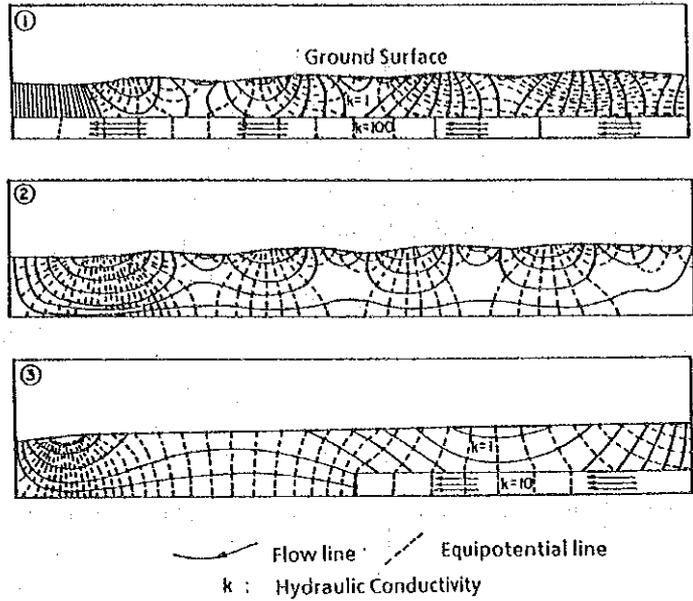


(1) Modèle d'écoulement (Hubbert, 1940) et système d'écoulement typique de l'eau souterraine

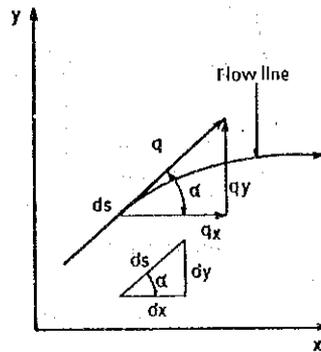


(2) Systèmes d'écoulement régional, intermédiaire et local (Toth, 1963)

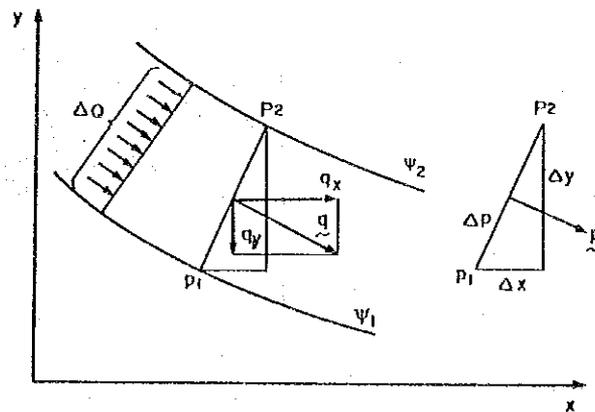
(./.)



(3) Systèmes d'écoulement stables en différents cas

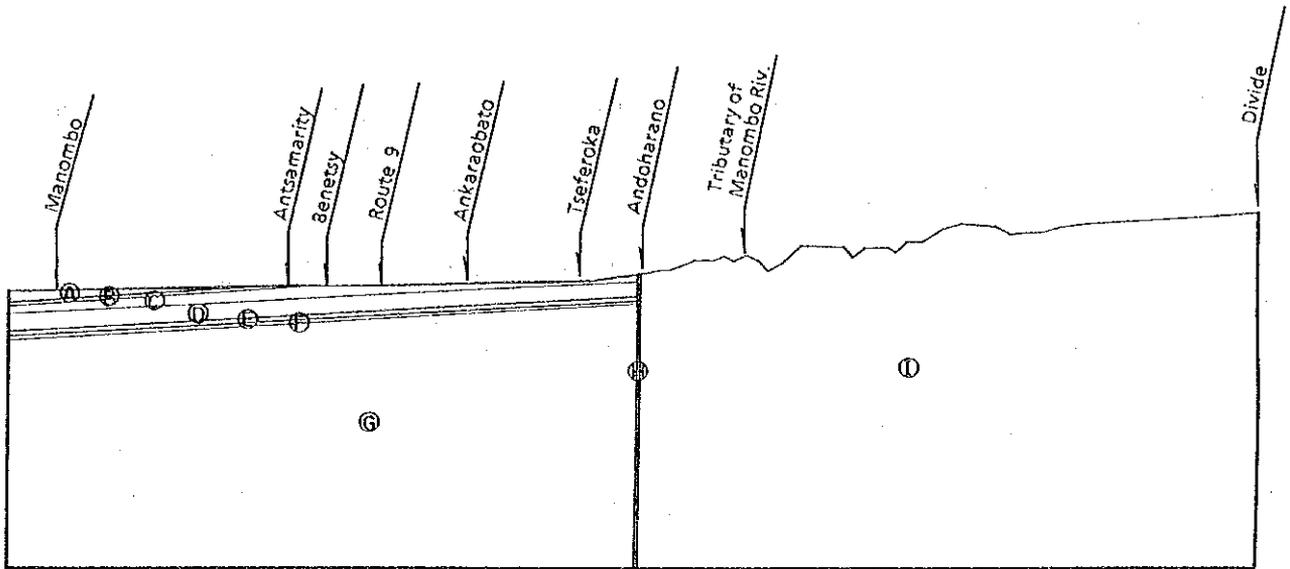


(4) Ligne d'écoulement (Bear, 1979)

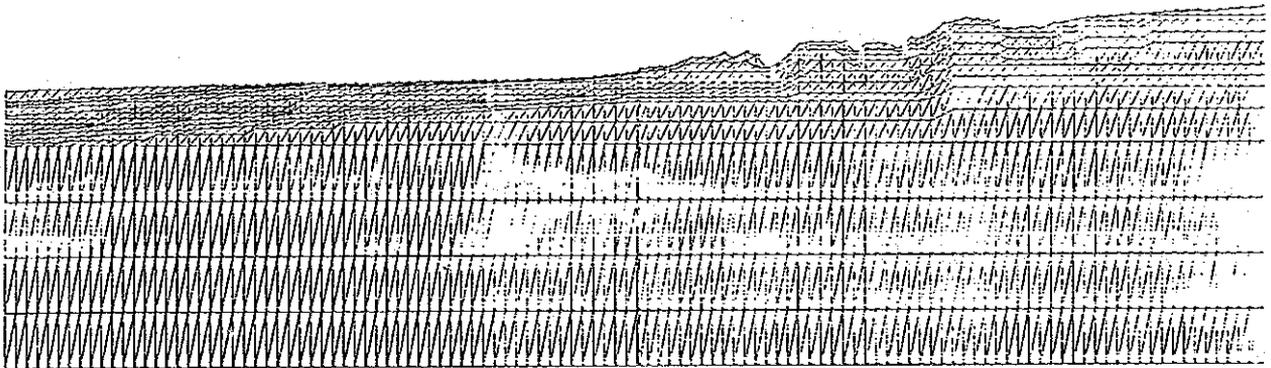


(5) Flux sur la ligne d'écoulement (Bear, 1979)

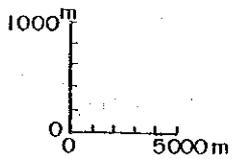
(./.)



(1) Section sélectionnée



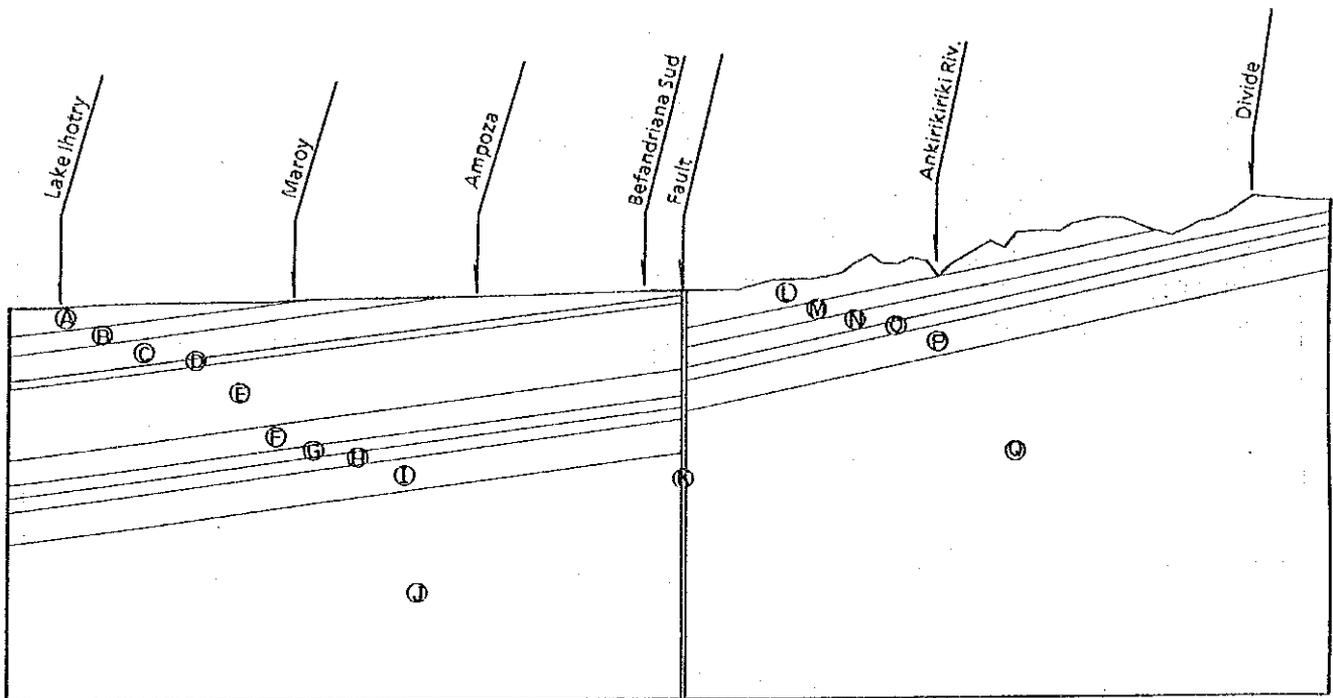
(2) Elément triangulaire



(3) Conductivité hydraulique

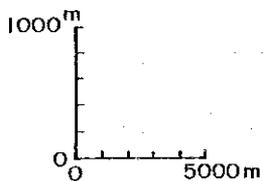
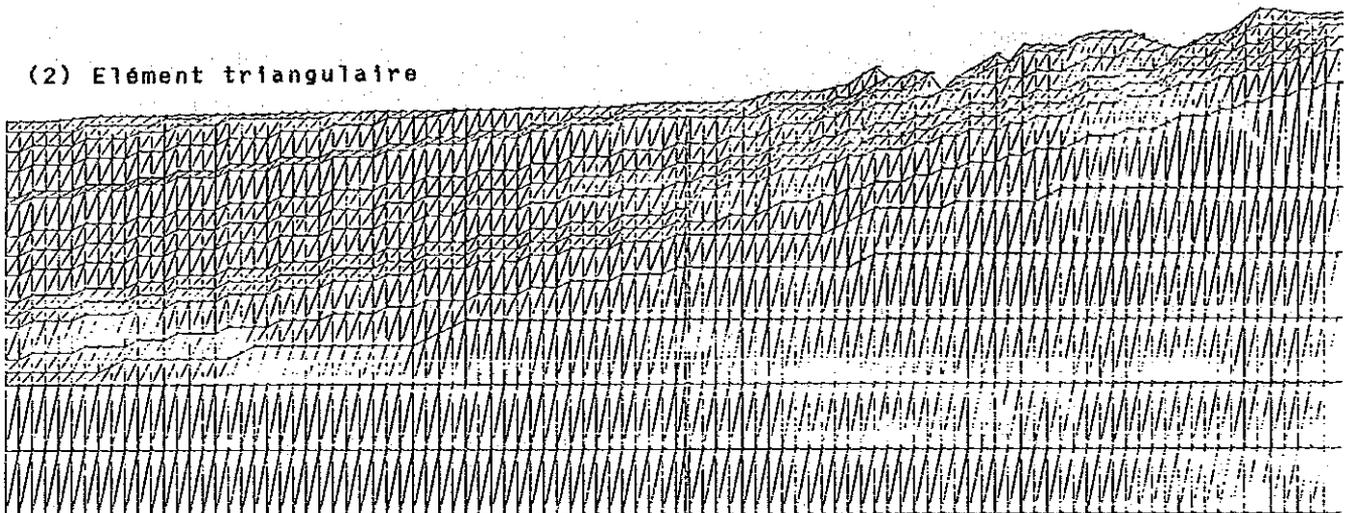
		Hydraulic Conductivity(m/day)	
		Case 1	Case 2
A	Sandstone	0.864	0.864
B	Sandstone	0.864	0.864
C	Sandstone	0.864	0.864
D	Limestone	0.864	8.64
E	Sandstone	0.864	0.864
F	Marl	0.864	0.864
G	Limestone	0.864	8.64
H	fault	0.864	0.0864
I	Limestone	0.864	8.64

Figure 7.2.2 Conditions pour la simulation (Androharano ~ Manombo Atm)



(1) Section sélectionnée

(2) Elément triangulaire

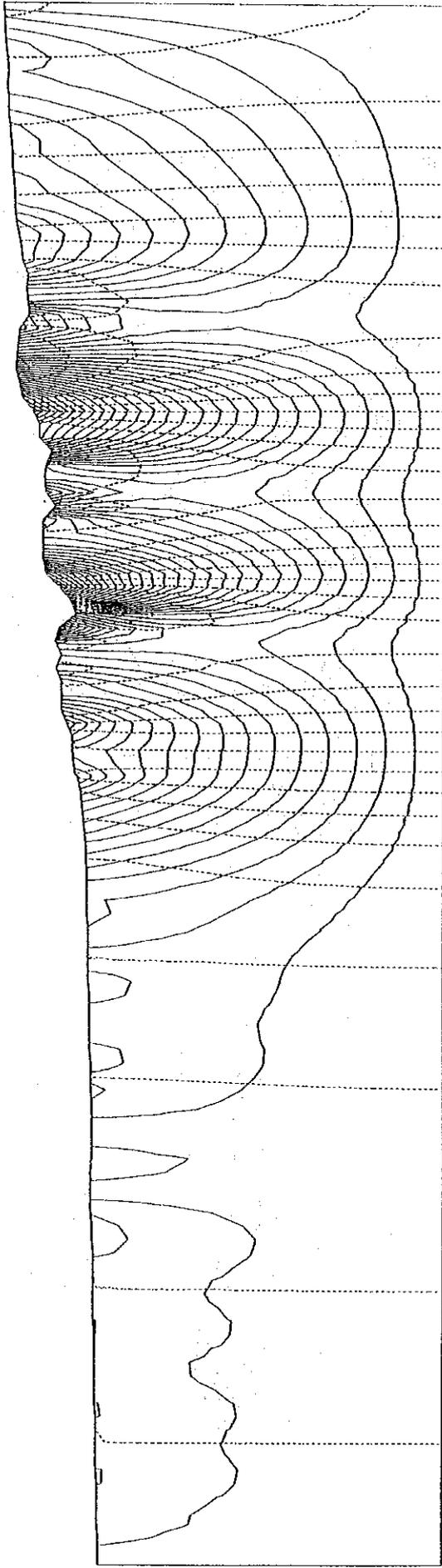


(3) Conductivité hydraulique

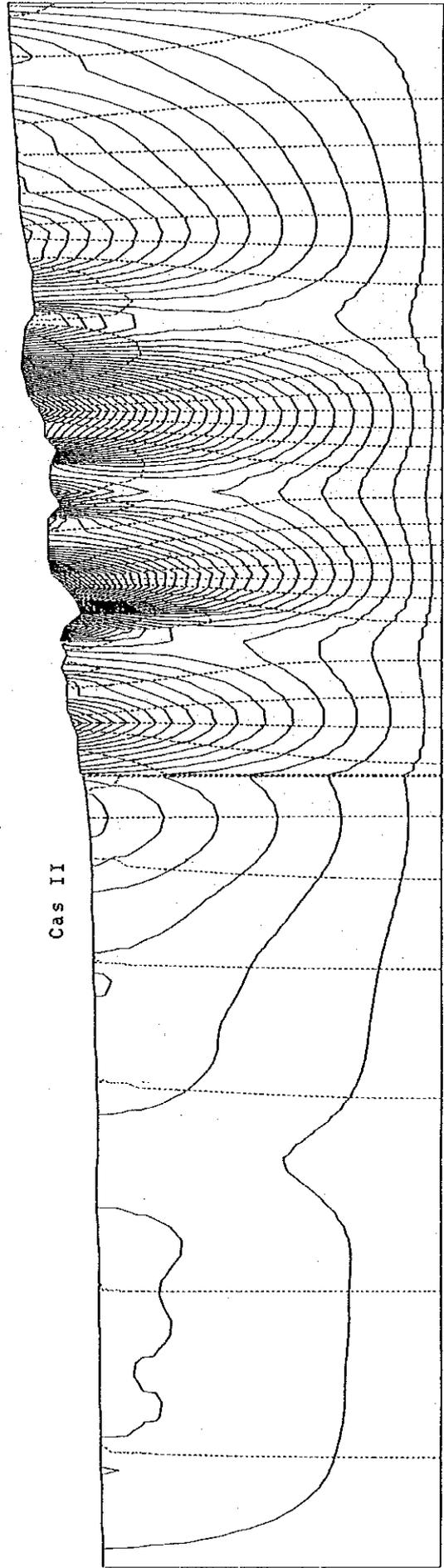
		Hydraulic Conductivity(m/day)		Hydraulic Conductivity(m/day)			
		Case 1	Case 2	Case1	Case2		
A	Sandstone	0.864	0.864	J	Basalt	0.864	0.273
B	Sandstone	0.864	0.864	K	fault	0.864	0.864
C	Sandstone	0.864	0.864	L	Limestone	0.864	8.64
D	Marl	0.864	0.273	M	Marl	0.864	0.273
E	Limestone	0.864	8.64	N	Marl	0.864	0.273
F	Marl	0.864	0.273	O	Sandstone	0.864	0.864
G	Marl	0.864	0.273	P	Mudstone	0.864	0.273
H	Sandstone	0.864	0.864	Q	Basalt	0.864	0.273
I	Mudstone	0.864	0.273				

Figure 7.2.3 Conditions pour la simulation (Befandriana~Lac Ihotry)

Figure 7.2.4 Résultats de la simulation (Androharano ~ Manombo Atm)

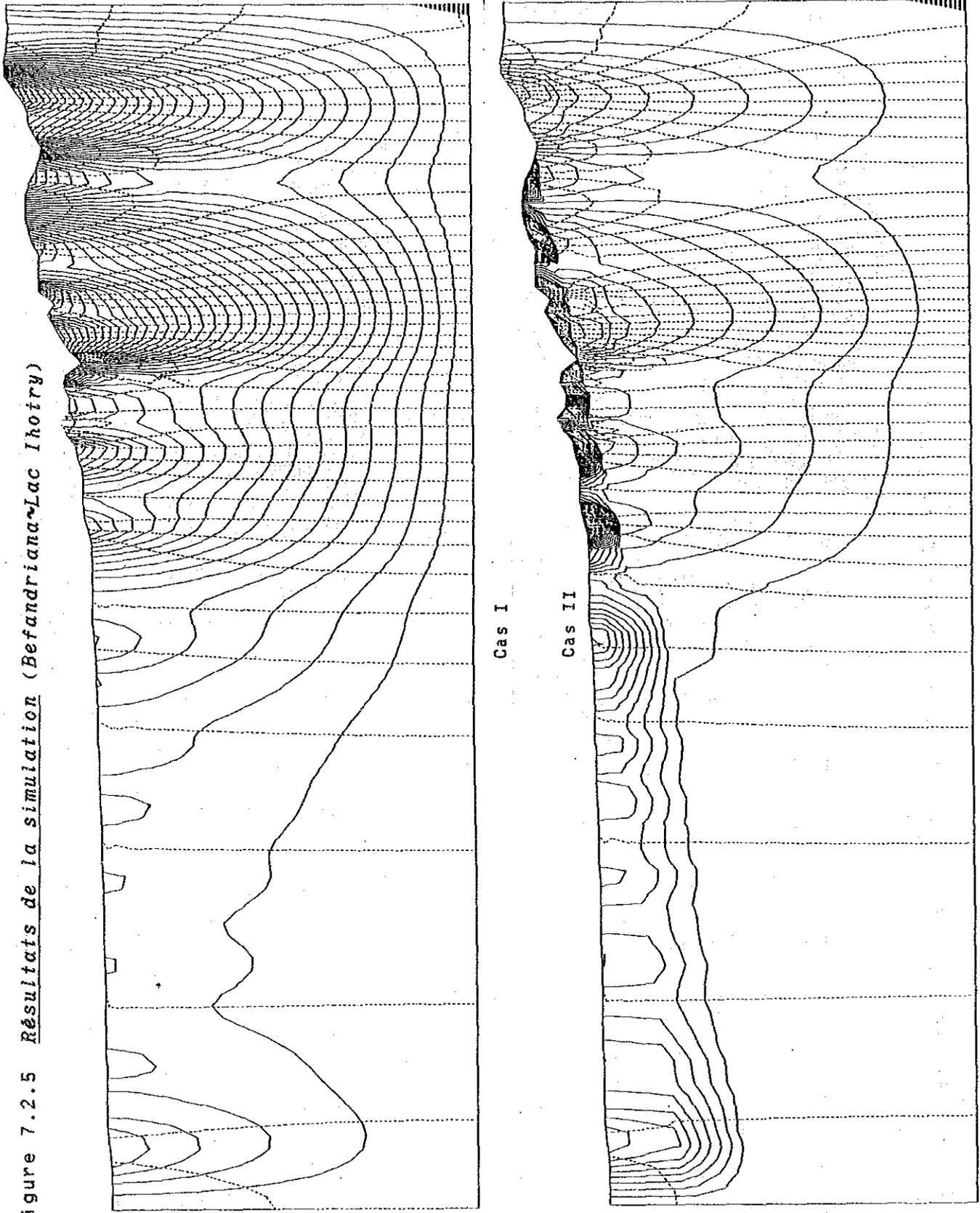


Cas I



Cas II

Figure 7.2.5 Résultats de la simulation (Befandriana-Lac Ihoity)



7.3 Potentiel de développement des eaux souterraines

Une carte hydrogéologique (échelle: 1/250.000), assortie de profils hydrogéologiques, a été ébauchée dans la perspective d'aboutir à l'évaluation des caractères potentiels des ressources en eaux souterraines. Cette carte, qui prétend représenter les possibilités de développement des ressources s'appuie naturellement sur l'ensemble des résultats des différentes études: analyse des images par satellite et photos aériennes, reconnaissances géologiques, prospections géophysiques, forages test, essais de pompage et analyse de la qualité d'eau.

Elle est d'ailleurs servie, avec les profils qui l'accompagnent, non seulement dans l'analyse du bilan hydraulique et la simulation de modèles des pages précédentes, mais aussi pour la vérification des conséquences de ces études.

La carte hydrogéologique met en évidence que le potentiel de développement est généralement élevé dans la Zone de l'Etude, sauf certains sites constitués de dépôts marins appartenant au Jurassique moyen et supérieur ou au Crétacé moyen et inférieur caractérisant la plaine centrale de la Zone ou ceux dont la qualité de l'eau semble problématique.

Il peut être par conséquent attendu que, dans la Zone de l'Etude, les ressources en eaux souterraines dont le potentiel est considéré comme étant élevé non seulement couvrent la déficience actuelle en eau potable, mais également contribuent, dans des sites d'une grande potentialité, au développement des activités agricoles ou industrielles.

Les zones dont la grande potentialité a été justifiée par les forages test sont les suivantes:

(unité: m³/jour/m)

Zones	Capacité spécifique
Befandriana	438,58
Sihanaka	232,26
Analatelo	7.224,00
Mangotroka	281,35
Soahazo	173,33
Manombo Atm.	609,23
Toliara ⁽¹⁾	3.057,00

(1) Nappe dans les calcaires à l'Est de Toliara, à savoir Miary et Manoroka.

Dans ce qui suit, sont évaluées en détail les caractéristiques hydrogéologiques de chacun des principaux bassins de la Zone de l'Etude:

7.3.1 Delta du Mangoky

a) Relief

Le delta du Mangoky occupe une superficie d'environ 1.100km². D'une forme triangulaire ouverte Nord-Ouest dont le point culminant est aux environs de Nosy-Ambositra, il est isolé du bassin du Lac Ihotry par des collines de relief ondulé hautes de 80m environ s'allongeant vers la direction SE-NO.

A l'altitude de 53m, le point culminant du delta est à pendage moyen modéré de 1/1.000 vers le Nord-Ouest. Sur les photos aériennes et images satellite, on aperçoit, en dehors de l'itinéraire actuel, un maillage développé d'innombrables anciens tracés fluviaux. Les villages sont localisés pour la plupart au pied de la colline de la rive gauche en amont ou sur la levée naturelle en aval.

b) Géologie

Le Mangoky traverse, par son ravin profond, la marge Nord du massif de Mikoboka avant d'aboutir au delta. L'extrémité Nord du massif de Mikoboka, constituée de grès calcaire et de calcaire marneux du Crétacé en partie inférieure et de calcaire de l'Eocène inférieur en partie supérieure, est à pendage de 2° à 3° vers l'Ouest. Les grès calcaires du Crétacé supérieur sont très consolidés, mais poreux et rougeâtres dans l'ensemble. A stratification entrecroisée, ils sont intercalés de couches peu épaisses riches en fer. Les calcaires de l'Eocène sont gris foncé, massifs, très durs et fissurés de façon irrégulière.

La colline qui s'étale du Sud du delta vers la direction SE-NO comporte principalement, à stratification entrecroisée, des grès grossiers peu compacts et brunâtres. Les couches s'inclinent vers l'Ouest avec quelques degrés. Dans la partie inférieure de la colline, on trouve, en plus des grès continentaux, des couches marines comprenant l'alternance des grès jaunes à grain moyen et silts verts ou encore des silts siliceux. La base est formée de calcaires poreux. La période à laquelle ces couches appartiennent n'étant pas encore déterminée, nous considérons qu'elles font partie, dans leur ensemble, de l'Eocène moyen et supérieur.

La puissance et les faciès de l'Alluvion constituant le delta étaient inconnus, mais le sondage électrique effectué dans la présente Etude (le forage en essai n'a pas été exécuté) nous a permis de considérer que l'alluvion peut atteindre son maximum d'épaisseur avec 110 à 120m. On trouve là une importante portion, peut-être formée de couches sableuses, de haute

résistivité. D'autre part, certains documents nous apprennent que les couches épaisses de basse résistivité se reposent dans la partie inférieure de l'Alluvion. Il nous semble par conséquent raisonnable de considérer ici que les marnes ou argiles marneuses dominent toujours l'Eocène moyen et supérieur.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

Les puits utilisés pour l'eau potable qu'on a pu constater dans le delta du Mangoky sont localisés dans le tableau 7.3.1. Ils sont pour la plupart peu profonds de moins de 10m et situés à l'altitude inférieure à 25m. Ils atteignent l'eau souterraine libre dans la nappe aquifère de l'Alluvion, mise à part quelques puits à l'altitude élevée (Ambiky et Marovato) exploitant l'eau libre dans la nappe constituée de grès continentaux de l'Eocène moyen et supérieur de la colline de la rive gauche du Mangoky.

En saison sèche, le niveau statique ne va pas au-delà de -4m du niveau du sol. Selon des villageois, le niveau peut monter de 1 à 3m pendant la saison humide. En tous cas, la mesure en saison humide du niveau de l'eau souterraine n'ayant pas été confirmée dans la présente Etude, nous ne pouvons préciser sa variation saisonnière.

Quant à l'écoulement des nappes libres, il n'est pas très clair, dû au faible nombre des puits étudiés. En général, il semble que le régime peut être distingué en deux mouvements: grand mouvement s'écoulant suivant la pente du delta du Sud-Est au Nord-Ouest dans la nappe aquifère des sables de l'Alluvion et le mouvement de moindre importance qui se déplace dans la nappe des grès continentaux de l'Eocène moyen et supérieur le long des vallées creusées dans la colline.

Un document existant relate la présence d'une importante nappe captive dans les formations calcaires de l'Eocène inférieur à Nosy-Ambositra, près de la pointe du delta du Mangoky. Ceci n'a pas été vérifié dans notre Etude, mais il est fort possible que le marais à l'Ouest de Nosy-Ambositra soit alimenté par résurgence des eaux souterraines dans la nappe de l'Eocène inférieur.

Plus à l'Est, à Tsiarimpioke, il existe au niveau du lit fluvial du Mangoky une source artésienne d'eaux chaudes d'environ 45°C, utilisée par les habitants avoisinants pour le bain. Ces eaux proviennent des couches calcaires du Crétacé supérieur.

d) Qualité de l'eau souterraine

Les différents types de la qualité des eaux souterraines, échantillonnées à partir des puits implantés dans la zone considérée, sont donnés à la figure 7.3.1. Ce sont les eaux non captives. La majorité d'elles relèvent au type I, apparentées aux eaux du cours et du canal, à l'exception des eaux type VI des puits à proximité de la côte (puits No. 3, 4 et 9), affectées par l'eau de la mer.

Il y a 4 puits, tous situés près de la côte, dont la chlorosité est particulièrement élevée, mais sans compter d'autres où l'eau est salée selon les habitants. Localisés en aval du delta, ces puits subissent l'influence de l'eau de la mer.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

Les nappes aquifères les plus exploitées dans la zone sont les couches sableuses de l'Alluvion, à une profondeur de moins de 10m du niveau du sol. L'essai de pompage n'a pas été effectué dans l'Etude, mais d'après un document disponible, le puits de Tanandava (profond de 29m) aboutissant aux sables relativement profonds de l'Alluvion témoignait, à l'époque de sa construction en 1964, d'un débit de 12m³/h avec débit spécifique de 24,46ℓ/mn./m.

En général, l'eau souterraine qu'on peut capter de l'Alluvion ne pose pas de problème majeur de potabilité, mais au-dessus de -10m, le rabattement du niveau est important avec une chlorosité sensible aux environs côtiers.

Si on tient compte du fait que l'Eocène moyen et supérieur formant le socle de l'Alluvion est constitué essentiellement des marnes et argiles marneuses, la possibilité de la présence de nappes en charge exploitables est faible.

Par contre, aux environs de Nosy-Ambositra où le Mangoky traverse le massif de Mikoboka, la potentialité reste élevée pour obtenir une eau souterraine artésienne dans les nappes calcaires de l'Eocène inférieur et du Crétacé supérieur.

7.3.2 Bassin du Lac Ihotry

a) Relief

La zone est une plaine basse d'altitude de 50 à 300m qui s'étend, en contact avec la partie Ouest du massif de Mikoboka, vers le Sud et le Nord avec une largeur de 20km environ. Elle est caractérisée par ses 3 éventails et par son réseau hydrographique convergeant sur le Lac Ihotry.

Le point culminant du cône de déjection de Befandriana le plus au Nord se trouve à l'altitude de 200m où le cours de la Befandriana apparaît en sortant du massif de Mikoboka. Le pendage de surface est de l'ordre de 1/40 à 1/250. Les cônes d'Ankoro et d'Andranodambo du Sud atteignent leur hauteur maximale à l'altitude de 300m. Leur forme d'éventail peut être reconnue sur les images du *Landsat*, mais n'est pas aussi visible sur la carte topographique que celle du cône de Befandriana.

A l'altitude de 50m, ce grand lac salé occupe une superficie de 100km² (chlorosité: 3.000ppm). Lors des crues, il est alimenté par réseau hydrographique susmentionné et drainé vers Mangolobolo. En raison sèche, la superficie du lac diminue et le réseau hydrographique disparaît.

b) Géologie

De même que celle de Manombo, cette zone était toujours considérée comme une des plus potentielles dans la région Sud-Ouest du pays quand il s'agit de développement d'eaux souterraines. En effet, de nombreux forages étaient effectués jusqu'à ce jour pour la recherche de nappes. En outre, nous avons réalisé, en aval de la présente Etude, 7 forages test à une profondeur approximative de 50m. C'est ainsi que nous sommes maintenant amenés à mieux connaître les conditions géologiques du sous-sol de la zone (Fig.3.8.6).

La zone est largement recouverte de formations de l'Eocène moyen et supérieur, et les bancs de niveau plus bas n'affleurent presque pas à la surface. Cependant, grâce aux relevés des forages mentionnés plus haut, on sait que des nappes de l'Eocène inférieur et du Crétacé supérieur sont escamotées dans une profondeur comprise entre 100 et 150m. L'Eocène inférieur est constitué de calcaire dans le massif de Mikoboka et de marnes à Andavadoaka sur la côte. Dans un document existant, il est supposé que ces différents faciès soient délimités par un couloir qui se prolonge en direction NEE-SOO au long de la route Befandriana-Bemoka où la résistivité électrique montre un brusque changement.

Aussi à l'Ouest de la route Basibasy~Andranomena, un couloir de résistivité discontinue s'allonge en NNO-SSE. Dans notre Etude également, on a pu vérifier sur les images du *Landsat* que ce couloir correspond à une linéarité très continue et par endroits il a été découvert certaines anomalies au terme du sondage VLF magnéto-tellurique. Il est donc raisonnable de le considérer comme une faille. A l'Ouest de la faille, l'Eocène inférieur pourrait être essentiellement marneux.

L'Eocène moyen et supérieur est constitué des grès continentaux, grossiers et rougeâtres dans la partie Nord, de marne et de calcaires en alternance, de caractère marin, souvent accompagnés de grès dans la partie Sud.

Les sondages antérieurs ont permis de connaître, sur plusieurs points à l'Ouest du tronçon Befandriana~Analatelo de la RN 9, la profondeur d'interface entre l'Eocène inférieur et l'Eocène moyen et supérieur. La figure 3.1.6 montre la configuration du niveau d'interface, tracée à partir des résultats des sondages antérieurs. Le niveau d'interface y est exprimé en deux fossés s'approfondissant du Sud-Ouest au Nord-Est. Ces fossés sous-jacents rencontrent le niveau de surface à Mandevy où les calcaires de l'Eocène inférieur affleurent sur le lit fluvial.

La figure 7.3.2 représente la composition de l'Eocène moyen et supérieur, dans les limites de la zone considérée, reproduite en empruntant les résultats de la présente Etude et les oeuvres de référence disponibles. L'Eocène moyen et supérieur est formé, dans le Nord, en grande partie des grès continentaux à grain gros ou moyen et de teinte brune rougeâtre, riches en grains quartzeux, sauf son niveau supérieur épais de 5m qui est marneux. Dans le Sud, à Analatelo et Basibasy, il est dominé plutôt par les marnes ou par l'alternance de marnes et de calcaire.

Dans la zone, bien que 3 cônes de déjection se fassent distinguer tant sur la carte topographique que dans les images satellite, le forage d'essai n'est pas arrivé à l'identification de sédiments propres au cône.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

La profondeur de la plupart des puits existants dans la zone ne dépasse pas le plus souvent 10m, ce qui indique que les nappes aquifères utilisées y sont relativement profondes par rapport à celles du delta du Mangoky.

Le faible nombre des puits dont le niveau de l'eau a fait l'objet de notre observation simultanée ne permet d'estimer le régime des eaux souterraines qu'aux environs de Befandriana où le niveau se situe à une profondeur comprise entre -5 et -10m du niveau du sol. Certains d'entre eux montrant une variation saisonnière du niveau de plus de 1m, les eaux souterraines de la zone ne semblent pas captives.

Le seul puits en fonctionnement qui prend sa source dans une nappe très profonde (126m) est localisée à Antanimieva. Les eaux jaillissantes proviennent des calcaires de l'Eocène inférieur. 10 sondages forés par l'ONU de 1966 à 1967, à l'altitude de 100 à 200m ont touché des nappes captives des calcaires de l'Eocène inférieur à la profondeur comprise entre 35 et 160m, dont 4 artésiens. A Mandevy, une résurgence abondante, aux affleurements des calcaires sur le lit de la rivière, est utilisée aux besoins domestiques.

Les eaux artésiennes sont une fois rechargées dans le massif de Mikoboka où la pluviométrie est forte grâce à l'altitude élevée avant de s'écouler via les couches de l'Eocène inférieur à pendage modéré de l'Est à l'Ouest. La pression augmente surtout dans une zone large de 3km étendue en NE-SO entre Befandriana et Mandevy pour permettre le jaillissement. Ce phénomène peut s'expliquer par le constat que l'Eocène inférieur fait passage aux marnes imperméables à l'Ouest et au Nord de la zone et que les failles de direction NE-SO et N-S interceptent l'écoulement des eaux souterraines orientées vers l'Ouest.

Par ailleurs, dans le bas-fond sableux qui s'allonge sur la rive Sud-Est du Lac Ihotry à l'altitude de 70m, on trouve sur la direction NE-SO de nombreux canaux d'une profondeur de 2,5 à 3m destinés à l'irrigation. L'eau souterraine suintant dans ces fossés est salée, dont le niveau est de -2,5m du niveau du sol en saison sèche et monte de 2m environ en saison humide. Ces canaux exploitent donc l'écoulement d'eaux souterraines libres qui se dirige du Sud-Ouest vers le Lac Ihotry.

d) Qualité de l'eau souterraine

Comme le montre la figure 7.3.1, les eaux libres et captives de la zone appartiennent au type I, caractérisées par la faiblesse de la chlorosité et de la conductibilité électrique. Par contre, les eaux de Manoy et de Basibasy montrent leurs teneurs élevées en chlore, nitrium et magnésium. A Manoy, la nappe correspond au niveau supérieur marneux de l'Eocène moyen et supérieur, et aussi à Basibasy les marnes de la même période reposent sur les calcaires de l'Eocène inférieur. Cette valeur significative de la teneur ionique est donc due aux sels contenus dans les marnes.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

Les nappes aquifères utilisées sont situées, en descendant vers le bas, dans les sables de l'Alluvion, grès de l'Eocène moyen et supérieur et calcaires de l'Eocène inférieur.

Les couches sableuses de l'Alluvion sont réparties à la surface des environs du Lac Ihotry. L'eau libre dans ces couches est à la profondeur de -3m du niveau du sol et utilisée pour l'irrigation, mais sa salinité ne garantit pas la potabilité.

Les nappes constituées des grès de l'Eocène moyen et supérieur, les plus exploitées dans la zone, se situent à la profondeur de 15 à 50m, dont la grosseur des grains tend à augmenter en fonction de la profondeur. Les forages effectués sur 7 points ont constaté un débit de 200 à 300l/mn et un débit spécifique de 30 à 200l/mn./m. Compte tenu du débit significatif et de la qualité satisfaisante, les eaux de ces nappes sont d'une grande utilité.

Toutefois, lorsque les grès de l'Eocène moyen et supérieur comportent des marnes, le débit spécifique n'est plus autant intéressant avec le goût salé, ce qui se solde par un faible potentiel.

Les calcaires de l'Eocène inférieur constituant une nappe d'eaux souterraines captives offrent une grande valeur d'exploitation. Le puits d'Antanimieva donnait, lors de son forage, un jaillissement d'eaux captives à un débit de 110l/s. A la source naturelle de Mandevy, on assistait à une résurgence de 620l/s. Nous avons vu que les eaux artésiennes sont présentes dans une zone large de 3km étendue en NE-SO entre Befandriana et Mandevy et leur pression diminue en direction Nord-Ouest.

En ce qui concerne les eaux captives dans l'Eocène inférieur, mentionnées dans le document existant, leurs débits spécifiques qu'on a relevés au terme de l'essai de pompage ont été de 262l/mn./m et 306l/mn./m.

7.3.3 Bassin de la Manombo

a) Relief

La zone représente un bas-fond large de 15 à 20km s'élargissant au Sud-Nord. Entourée à l'Est par le massif de Mikoboka et une partie du plateau de Belomotra-Vineta et à l'Ouest par une colline douce d'altitude de 100 à 200m, elle comprend trois cônes de déjection.

Situé à la limite Nord de la zone, le plus grand éventail de Sakamana, dont le point culminant est situé à l'altitude de 300m environ, est à pente moyenne de 1/150. Son vaste versant descendant de l'Ouest à l'Est est appelé le "plateau de Bevary". Le cône d'Amboboka trouve son point le plus haut à l'altitude de 200m, mais n'est pas autant visible sur la carte. Plus au Sud, le cône de Manombo a son point culminant à 125m d'altitude avec une pente moyenne de surface d'environ 1/150. La Manombo érode cet éventail jusqu'à une profondeur de 10 à 20m pour s'écouler vers l'aval, de direction NE-SO. L'Androka confluent en aval avec la Manombo passe du Nord au Sud, en contact avec les lisières des trois cônes de déjection.

Aux environs de la ligne de partage des eaux séparant la zone considérée et le bassin du Lac d'Ihotry, plusieurs collines coniques sont indépendamment dispersées par endroits à une hauteur relative de 10m. Par ailleurs, on trouve près de Betsioky quatre collines alignées le long de l'axe NNE-SSO. Des dunes côtières sont également développées, par-dessous desquelles les calcaires du socle affleurent.

b) Géologie

Le massif de Mikoboka à l'Est de la zone ainsi que le plateau de Belomotra-Vineta qui l'embrasse sont constitués des calcaires de l'Eocène inférieur, escamotés près du cône de Manombo et à l'altitude de 100 à 125m par les dépôts de cône d'éboullis.

Il y a des affleurements des calcaires sur la colline à l'Ouest de la RN 9. Ces calcaires, en comparaison avec ceux de l'Eocène inférieur, sont plus poreux et d'un moindre poids spécifique. Les forages d'essai qu'on a entrepris dans la zone pour la présente Etude démontrent que cette colline est formée non seulement des calcaires perméables, mais également des marnes sableuses et grès grossiers et présente une sensibilité

variation de faciès. La série de ces formations est impartie, dans le document existant, à l'Eocène moyen et supérieur. Les calcaires similaires affleurant sur la colline sur la rive gauche de l'estuaire de la Manombo, il semble que les couches du Quaternaire recouvrant, à la côte, l'Eocène moyen et supérieur sont peu épaisses.

Aux endroits où la Manombo approfondit le cône d'éboulis, on trouve la coupe des dépôts de cône: les dépôts sont constitués dans la partie inférieure d'un lit de graviers (ϕ max: 50cm) épais de plus de 3m, dans la partie intermédiaire des sables fins d'une épaisseur de 3m et dans la partie supérieure de l'alternance de silts et sables d'environ 2m d'épaisseur.

En ce qui concerne de nombreuses collines, isolées les unes des autres, dans les environs de la ligne de partage séparant la zone du bassin du Lac d'Ihotry, leurs surfaces sont recouvertes par des brèches de différentes dimensions des basaltes et ne présentent pas de laves ni de roches éruptives. De là, il est possible de considérer qu'elles font partie d'un volcan demantelé par érosion.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

Les puits dont la profondeur est connue sont au nombre total de 41. Ils peuvent être répartis selon leur ordre de profondeur: 6 puits à moins de 10m, 16 entre 10 à 20m, 14 entre 20 à 30m et 5 à plus de 30m. Les niveaux des nappes utilisées sont situés, en général, plus bas que ceux du bassin du Lac d'Ihotry. Il est à remarquer en outre que les puits ayant une profondeur supérieure à 20m convergent au Nord au delà de Namaboha et au Sud au delà de Milenaka et tous les puits dont la profondeur dépasse 50m se trouvent à la limite Nord de la zone (Betsioky Nord).

Notre observation simultanée sur le niveau statique de l'eau souterraine n'a intéressé que les puits à une profondeur de moins de 20m. L'isobathe, tracée à partir des résultats de cette observation, semble exprimer la forme des niveaux d'eaux souterraines libres, caractérisée par la pente du Nord au Sud suivant la vallée d'Androka.

Nous avons suivi pour une longue période le niveau de l'eau d'un puits d'Ambatolily, profond de 12m et situé à la lisière du cône de Manombo. Le niveau varie en fonction des précipitations et monte de 1m en saison humide. De ce fait, l'eau souterraine captée par ce puits n'est pas en charge.

Quant aux puits profonds de plus de 20m qui sont localisés au Nord au delà de Namaboha et au Sud au delà de Milenaka, ils atteignent les eaux enfermées dans les grès de l'Eocène supérieur. Les marnes reposant sur et sous ces grès donnent ainsi la pression aux eaux souterraines.

Les nappes plus profondes ont été également confirmées par deux forages exécutés entre 1967 et 1967 par l'ONU dans le cône de Sakamana. Par là, on rencontre le niveau supérieur de l'Eocène inférieur à la profondeur de -106m et -30m du niveau du sol. Le niveau statique des eaux captives est respectivement de -18m et -37m du niveau du sol. Partant de ce constat, il semble que les eaux souterraines en charge de l'Eocène inférieur, localisées juste sous le cône de Sakamana, s'écoulent en descendant du Nord-Est au Sud-Est.

Les résurgences sont nombreuses dans la zone. La source d'Anboboka, avec son débit abondant, est utilisée en permanence aux besoins domestiques et pour l'irrigation. Ses eaux ressortent des formations calcaires de l'Eocène inférieur. Les autres résurgences à l'Ouest de l'Androka proviennent probablement des mêmes formations, si on tient compte de la tectonique de l'ensemble.

De plus, il existe encore un certain nombre de résurgences au long de la zone côtière au Sud de l'embouchure de la Manombo, où les nappes aquifères sont formées par les dépôts sableux du Quaternaire reposant sur les marnes imperméables de l'Eocène moyen. La résurgence résulte donc de la réapparition d'eaux captives à la surface à travers les calcaires clastiques. On peut ainsi apercevoir sur les images du *Landsat* des écoulements d'eau douce ressortant de ces nappes pour déboucher dans la mer.

Les puits forés à Andrevo et Botsibotsy, localisés tout près du rivage de la mer, prennent leur source dans les nappes suspendues lenticulaires en eau douce, et coulent vers la mer s'imprégnant en dessous des couches sableuses.

d) Qualité de l'eau souterraine

La qualité des eaux de la zone est du type I ou IV, mais la proportion du type IV est plus importante dans cette zone qu'au bassin du Lac d'Ihotry (Fig.7.3.1).

L'eau dont la qualité est classée comme le type IV peut se caractériser par sa teneur élevée en chlore, sodium et magnésium avec son goût plutôt salé. Elle a son origine dans les nappes de l'Eocène moyen et supérieur, mise à part l'eau des puits des points numérotés (69) et (76) qui sont influencées par l'eau de la mer.

A Soahazo, on compte 3 puits existants, auxquels s'ajoutent 2 puits qui ont été forés dans le cadre de la présente Etude. La teneur en chlore est particulièrement élevée dans l'eau des puits peu profonds (28m et 34m). La comparaison sur la qualité de l'eau pour quelques puits de différentes profondeurs en section entre Benetsy (à proximité de l'embouchure de la Manombo) et Ankilimalinika (plus au Sud) relève que l'eau des puits aboutissant aux couches peu puissantes de grès intercalés des marnes épaisses au niveau supérieur témoigne d'une valeur sensible tant pour la teneur en chlore que pour la conductibilité électrique, alors que ces valeurs sont contrairement faibles quand il s'agit de celle des puits dont l'origine est dans les grès du niveau inférieur épais de 3m et plus (Fig.7.3.3).

Des observations ci-dessus, il ressort que la salinité qui, absorbée une fois par les marnes dominantes dans la partie supérieure des formations, se dissout ensuite dans les eaux souterraines est la cause de l'altération de la qualité d'eaux venant des nappes de l'Eocène moyen et supérieur.

Par opposition, la qualité de l'eau de la source ressortant des couches de l'Eocène inférieur s'approche de celle de la résurgence de Mandevy ou du puits artésien d'Antanimieva dans le bassin du Lac d'Ihotry, avec teneur en chlore et conductibilité très faibles.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

Les nappes aquifères utilisables dans cette zone sont situées dans les formations de sables de dune côtière et des grès ou calcaires de l'Eocène moyen et supérieur.

Etant donné que les eaux s'écoulant dans les sables de dune côtière proviennent des nappes suspendues lenticulaires formées au-dessus de l'eau de la mer, leur exploitation stable s'avère difficile avec un débit bien limité.

Les nappes aquifères, situées dans l'Eocène moyen et supérieur, peuvent se distinguer selon leur faciès en deux groupes: le premier groupe comprend les nappes épaisses de plus de 3m, constituées de calcaires, de calcaires marneux et de grès à grains moyen et grossier avec un débit spécifique supérieur à 40l/mn./m. Le deuxième embrasse les nappes formées principalement par des grès peu puissants, intercalés de marnes sableuses, de grès marneux et de marnes épaisses, offrant un débit spécifique inférieur à 40l/mn./m avec une qualité peu satisfaisante de l'eau. Les nappes aquifères appartenant au premier étant généralement localisées à une profondeur de plus de -30m du niveau du sol, il faut forer des puits dont la profondeur dépasse 30m pour atteindre l'Eocène moyen et supérieur de la zone.

La source naturelle d'Amboboka est liée à une nappe aquifère constituée de calcaires de l'Eocène inférieur. Selon notre observation, elle offre un débit spécifique remarquable, soit 3.100ℓ/s. De même, le document existant relate qu'un essai de pompage, effectué dans le cône de déjection de Sakamana et visant les eaux captives de cette nappe calcaire a relevé un débit spécifique de 32,4 à 139,2ℓ/mn./m. En conséquence, la nappe en question peut garantir une très grande productivité et ne pose aucun problème du point de vue qualité de l'eau, mais son exploitation sera assez difficile, étant précisé qu'elle est fortement profonde à l'Ouest de la faille de Toliara.

7.3.4 Delta du Fiherenana

a) Relief

Le delta est formé à l'endroit où le cours du Fiherenana termine son passage dans le plateau de Belomotra-Vineta. Sa superficie n'est pas importante, à peu près 150km², y compris les plaines côtières en contact au Sud et au Nord avec le delta. Il se prolonge, entre la bordure Ouest du plateau (20m d'altitude) et l'estuaire du Fiherenana, sur une longueur de 20km. Le plateau de Belomotra-Vineta et le delta du Fiherenana qui comprend les plaines côtières sont nettement démarqués par une falaise rectiligne à une hauteur relative de 50m environ.

Une série des plaines côtières étendues au Sud et au Nord du delta sont largement occupées par des dunes anciennes et récentes. Dans l'agglomération de Toliara, les dunes sont terrassées.

b) Géologie

La ville de Toliara était alimentée par des forages (dont la profondeur était de moins de 15m) dans le lit du fleuve. Selon le document disponible, les alluvions occupent jusqu'à 10 ou 11m de profondeur, au-dessous desquelles reposent des formations argileuses. Près de là, il y a un puits profond de 34,8m qui assure aujourd'hui l'alimentation en eau pour la ville. Les calcaires poreux de l'Eocène moyen se présentent à 6m du niveau du sol.

A Befanamy, à 3km du lit en descendant vers l'aval, le sondage électrique effectué dans la présente Etude permet de supposer la répartition des calcaires de l'Eocène moyen au-dessous de 10 à 15m de profondeur.

Par contre, à Tsonoabary, près de l'estuaire du fleuve, le niveau supérieur des calcaires se situe beaucoup plus profond (50 à 80m) avec d'importantes intercalations argileuses ou marneuses entre les alluvions et les calcaires.

D'autre part, le forage de recherche de pétrole, exécuté à une profondeur de 2.195m dans le delta (altitude: 10m) au Nord-Est de Toliara, avait rencontré à 159m de profondeur les marnes de l'Eocène moyen et à 300m de profondeur celles de l'Eocène inférieur ou de la Série paléocène, accompagnées de bancs peu épais de calcaires.

Ainsi, au delta du Fiherenana, à la frontière de Befanamy séparant l'Est et l'Ouest de la zone, la profondeur du niveau supérieur de l'Eocène moyen et le faciès des dépôts qui le couvrent diffèrent sensiblement. Ce fait peut suggérer la présence d'une faille escamotée de direction Sud-Nord dans les environs. Une anomalie a été d'ailleurs constatée lors de notre étude VLF magnéto-tellurique, mais aucune linéarité correspondante n'est visible dans les images satellite.

Dans le document existant, la faille de Toliara, la plus importante de la région, est mise en concordance avec la falaise dominant à une hauteur relative de 50m de la marge Est du delta du Fiherenana. Les données VLF relèvent également, dans les environs de la falaise, une zone anormale mais plus étroite par rapport à celle de l'Ouest de Befanamy (Fig.3.7.2).

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

Il existe dans la zone des puits peu profonds de moins de 10m et des puits profonds de plus de 40m. Les premiers captent les eaux libres dans les formations sableuses de l'Alluvion dont le niveau statique reste inférieur à -6m du niveau du sol, même en saison sèche.

Il semble que le niveau de cette nappe de l'Alluvion qui se trouve à l'altitude de 20m aux environs de Miary penche de façon modérée vers la côte, mais nous ne pouvons malheureusement pas entrer en détail sur ce point, à défaut de données chiffrées.

Quant aux puits profonds, ils utilisent les eaux présentes dans les nappes de calcaires ou de grès calcaires de l'Eocène moyen. Ces eaux peuvent être captives, étant donné peu de variation saisonnière du niveau de l'eau.

d) Qualité de l'eau souterraine

La qualité des eaux de la zone n'a pas fait l'objet de notre analyse. Nous disposons toutefois d'un document de référence pour savoir que la différence qualitative n'est pas sensible entre les eaux peu profondes du delta du Fiherenana et celles captées dans les calcaires de l'Eocène moyen et que les eaux sont très légèrement chlorurées, sauf aux environs de la côte.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

Les nappes aquifères exploitables dans la zone se trouvent dans les formations sableuses de l'Alluvion et les calcaires de l'Eocène moyen situés à l'Est au delà de Befanamy.

Selon l'essai de pompage, effectué sur 3 forages de Miary destinés à alimenter la ville (profonds de 41 à 42m), le débit spécifique est estimé respectivement à 217,5l/mn./m, 874,0l/mn./m et 4.083l/mn./m, ce qui permet de justifier une haute productivité des formations calcaires de l'Eocène moyen. Le débit y est abondant, du fait que les nappes s'alimentent dans l'ensemble du bassin du Fiherenana.

Par contre, il sera difficile de trouver des nappes positives dans les formations de l'Eocène inférieur, elles étant essentiellement constituées de marnes.

7.3.5 Plateau de Belomotra-Vineta

a) Relief

Le plateau de Belomotra-Vineta s'élargit sur une largeur de 60km environ au Sud du massif d'Analavelona. Le paysage topographique change à la frontière d'une colline à l'Ouest d'Andranovory, localisé à la plus haute altitude sur le tronçon Toliara-Sakaraha de la RN 7.

La partie Ouest du plateau est à pendage moyen de 1/100 en descendant vers l'Ouest, où l'altitude diminue de 400m à 200m environ. Examinée de plus près, elle est constituée par un ensemble de plaines plates de niveau délicatement différencié. Sur les photos aériennes on trouve par endroits des dolines et des ouvalas. A la bordure Ouest du plateau, un certain nombre de collines isolées apparaissent à une hauteur relative de 50 à 100m par rapport à la surface plate. Leur versant est assez escarpé et le sommet plat. Le système hydrographique y montre une forme typique pouvant caractériser le plateau calcaire, si complexe qu'on peut mal discerner les limites du bassin du Fiherenana et de l'Onilahy.

Par contre, à l'Est du plateau, la plaine à l'altitude de 400 à 450m s'élargit jusqu'au pied du massif de Belomotra-Vineta avec une densité hydrographique bien faible. La seule vallée développée en direction Sud-Nord coule vers l'Ouest en ramassant des eaux du massif et va rejoindre le Fiherenana. L'eau y maintient un certain débit même en temps sec et appelle ainsi des vendeurs d'eau.

b) Géologie

On peut assister à la strate constituant le plateau là où la RN 7 commence à descendre de la marge Nord du plateau vers la vallée du Fiherenana. Elle comprend de grès continentaux et de calcaires poreux du Crétacé supérieur, intrus par des bancs de coulée basaltique.

Un forage d'essai a été effectué cette fois-ci à Tranokaky, situé à l'altitude de 430m au coeur du plateau. Le banc de basaltes, au nombre de 2, est épais de 115m en niveau supérieur (entre -15 et -130m du niveau du sol) et de 9m en niveau inférieur (entre -141 et -150m). Les basaltes, compacts et durs en principe, y sont le plus souvent fissurés en brèches, donc très perméables dans l'ensemble.

Comme l'on n'arrive pas à voir, depuis le côté de la bordure Nord du plateau, les marnes recouvrant le niveau supérieur des basaltes, il semble qu'elles ne sont réparties qu'à l'intérieur du plateau et servent à niveler la surface du terrain. Dans le niveau inférieur des basaltes, on trouve des roches de boue noires sur une épaisseur de 30m.

A Andranovory (altitude: 483m) situé à la marge Ouest du plateau, la strate est composée, jusqu'à 137m de profondeur, de grès, calcaires, calcaires sableux ou argileux et les basaltes sont absents. Si on considère les résultats du sondage électrique, les bancs de basaltes pourraient exister au-dessous de -180m du niveau du sol.

Le forage d'essai à Befoly (altitude: 225m), localisé au centre du plateau, constate une succession des calcaires de teinte grise un peu foncée qui se poursuit jusqu'à 226m de profondeur, sauf à la couche superficielle épaisse de 4 à 5m. Ces calcaires, identifiés à l'Eocène inférieur, sont massifs et cohérents au niveau supérieur d'une épaisseur de 50m, mais au plus bas, poreux et fort fissurés. La présence des calcaires est d'ailleurs affirmée, dans une documentation existante, jusqu'à -218m du niveau du sol à Andranohinaly (altitude: 250m) situé à 5,5km au Nord-Est de Befoly.

A la partie Ouest du plateau de Belomotra-Vineta, on voit sur la carte géologique existante que l'Eocène moyen recouvre en discordance l'Eocène inférieur. Une série des couches correspondante de l'Eocène moyen apparaissent à la surface de façon continue à la falaise près de l'estuaire de l'Onilahy. Elles sont constituées des calcaires (faciès est compact ou poreux) et de diverses roches détritiques calcaires et caractérisées par un changement considérable de faciès. En particulier, la prédominance des conglomérats calcaires comportant des coquilles d'huître est marquée. La série de calcaires et de roches détritiques que notre forage d'essai a découverte à Manoroka jusqu'à 60m de profondeur devrait correspondre à la partie plus basse de l'Eocène moyen.

On distingue ainsi, en se déplaçant de l'Est à l'Ouest, le Crétacé supérieur, l'Eocène inférieur et l'Eocène moyen. Ces trois différentes séries se superposent en discordance et s'inclinent dans leur ensemble vers l'Ouest. En tous cas, le fait que les séries ne sont qu'à pendage bien modéré et déplacées par de nombreuses failles rend pratiquement difficile de connaître la structure géologique de la zone.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

Dans le plateau de la zone, obtenir de l'eau souterraine par puits peu profond étant infaisable, les villages dispersés le long de la RN 7 possèdent très rarement leurs puits et dépendent de l'eau de pluie et des vendeurs d'eau pour satisfaire les besoins domestiques.

Par exception, à 6km environ à l'Ouest d'Andranovory, aux abords de la RN 7, de nombreux "vovo", simples puits creusés à la main, permettent le captage d'eaux souterraines libres. La profondeur des "vovo" se situent à quelques mètres à partir du fond d'une petite vallée à la source d'un des affluents du Fiherenana. Mais, ici, le rabattement progressif du niveau de l'eau est remarqué tous les ans.

On totalise 3 puits ayant une profondeur approximative de 10m à Tranokaky et à Befoly. Ils se tarissent en saison sèche. Ils font captages dans les nappes constituées de sable intercalé de marnes reposant sur le banc de basaltes ou de dépôts sableux reposant sur des calcaires. La présence de ces nappes ne pourrait être que bien locale, si on tient compte du fait qu'on ne trouve pas de pareils puits dans d'autres villages.

Par le forage test exécuté cette fois-ci à Tranokaky du plateau de Vineta, on a pu obtenir de l'eau souterraine de nappe captive à partir d'un banc basaltique. Le niveau statique est de -16,2m du niveau du sol. Ici, se développent les couches imperméables de roches de boue au-dessous de -135m, sur lesquelles reposent les bancs de basaltes, puissants, fort fissurés et aquifères. Le puits d'Andranovory (profond de 136m, plus en fonctionnement à l'heure actuelle) avait puisé probablement l'eau captive dans les grès appuyés sur le banc basaltique. Le niveau statique était relevé à -117m à l'époque de son forage.

D'autre part, à Befoly sur le plateau de Belomotra, notre forage d'essai a enfin atteint une nappe aquifère à 225m de profondeur avec le niveau statique de -179m (altitude: 46m). De même, au puits existant d'Andranohinaly (aujourd'hui hors de service), la profondeur de la nappe se situe à -220m (niveau statique à l'époque: -207m, altitude + 63m). De là, les eaux souterraines très profondes dans les formations calcaires de l'Eocène inférieur du plateau de Belomotra ne semblent presque pas captives et vont du Nord-Est au Sud-Ouest avec un gradient hydraulique d'environ 1/300.

A la rive droite de l'Onilahy à la limite Sud du plateau de Belomotra-Vineta, il existe de nombreuses résurgences. Le volume d'eau est abondant surtout aux environs d'Ambohimahavelona où la résurgence vient des calcaires de l'Eocène inférieur. Les eaux sont utilisées pour les besoins domestiques, mais également pour l'irrigation des rizières. Compte tenu du niveau et de la direction d'écoulement des eaux profondes dans les formations de l'Eocène inférieur que nous venons de décrire ci-haut, la résurgence à la rive droite de l'Onilahy résulte de l'apparition à la surface de ces eaux profondes. A la côte, au Nord de l'embouchure de l'Onilahy, les eaux résurgentes se jettent dans la mer.

Par opposition, les résurgences sont très rares au long du Fiherenana. Comparé à l'Onilahy, le Fiherenana est de pendage plus important et ses eaux se perdent dans le voisinage de Behompy pour devenir un parfait oued en aval. De ce fait et des observations plus haut, il est fort possible que les eaux souterraines profondes soient alimentées par le fleuve Fiherenana.

d) Qualité de l'eau souterraine

Les eaux souterraines de la zone, peu profondes ou profondes, sont affectées au type I. La teneur en chlore et la conductibilité électrique sont faibles. Du point de vue qualité, l'eau profonde de Bofoly venant des calcaires de l'Eocène inférieur est à peu près de même nature que celle du Fiherenana, ce qui permet de défendre l'hypothèse que la première est rechargée par la dernière.

L'eau de Tranokaky, captée à travers les bancs de basaltes, appartient, elle aussi, au type I, mais la différence réside dans sa teneur plus élevée en ions tels chlorure, sodium et magnésium, ceci étant imputable aux sels contenus dans les marnes recouvrant les bancs basaltiques.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

Les nappes aquifères exploitables dans le plateau de Vineta sont productives dans les bancs de basaltes, épais et fissurés. A Tranokaky, les assises basaltiques se trouvent, sur une épaisseur de 115m, au-dessous de -15m à partir de la surface du sol. Leur débit pompé et débit spécifique sont, d'après notre forage d'essai, de 110l/mn. et 11,65l/mn./m respectivement. Dans le plateau de Vineta, les bancs de basaltes se développent à l'horizontale et sont avérés très intéressants du point de vue profondeur et débit, mais sans oublier que leur fissuration irrégulière peut agir de façon considérable sur la capacité aquifère selon les endroits et que la qualité de l'eau serait détériorée en cas de présence des marnes au niveau supérieur.

Aux lisières du plateau de Vineta, les formations gréseuses du Crétacé supérieur peuvent constituer des nappes aquifères, mais avec restriction de leur répartition. A Andranovory, les eaux montant de ces nappes offrent un débit de 150l/mn./m, selon notre essai de pompage.

Les couches calcaires de l'Eocène inférieur peuvent constituer des nappes aquifères très potentielles au plateau de Belomotra, mais la profondeur à forer devra atteindre plus de 200m pour permettre des captages. Le débit est de 110l/mn. à Befoly (selon les résultats d'un forage d'essai) et de 100l/mn. à Andranohinaly (selon les données disponibles). Toutefois, l'exploitation de ces eaux non captives suppose la mise en place d'une pompe submersible motorisée.

Comme nous l'avons mentionné, il semble que ces eaux libres partent du Fiherenana pour rejoindre l'Onilahy, via les formations calcaires avec un gradient extrêmement modéré, mais cela ne doit pas vouloir dire que les captages sont toujours faisables à une profondeur donnée. D'habitude, l'itinéraire d'eaux souterraines est bien limité surtout lorsqu'il s'agit d'un plateau calcaire. Il faut donc, avant d'entreprendre des forages profonds de 200 à 300m, procéder à l'identification de points à travailler à l'issue du sondage électrique et d'une étude sur la linéarité géologique.

Près de la marge Ouest du plateau de Belomotra, les nappes aquifères peuvent être découvertes dans les calcaires de l'Eocène moyen. Le débit des eaux souterraines, relevé à Manoroka, a été de 158l/mn. sans rabattement du niveau.

7.3.6 Bassin du Fiherenana

a) Relief

La zone présente une cuvette montagneuse d'une altitude de 300 à 500m, formée au long du cours intermédiaire du Fiherenana où se concentrent ses nombreux affluents. La ville de Sakaraha est située sur la bordure Sud-Est de ce point de jonction fluviale. La cuvette est envahie au Nord-Est par le cours principal du Fiherenana et au Nord-Nord-Est par le principal affluent de celui-ci, l'Ilovo. En outre, à partir du versant Sud-Est du massif d'Analavelona, situé à l'Est de la cuvette, de nombreux affluents tels l'Ilova aboutissent au Fiherenana tout en s'écoulant presque à l'horizontale.

Le relief de la cuvette peut être caractérisé par des collines indépendantes au sommet plain qui se développent à une hauteur relative de 30 à 50m aux environs de Sakaraha. Elles sont nombreuses sur une zone large de 5 à 10km à l'extension Sud-Est du massif de Lambosy. L'apparence singulière des courbes de niveau permet de les distinguer facilement sur la carte topographique.

b) Géologie

Le massif ainsi que les collines dans la cuvette, séparés en deux parties par la faille d'Ilovo qui se dresse selon la direction NNE-SSO parallèlement à l'Ilovo, sont constitués du système Jurassique à la partie Est et du système du Crétacé inférieur à la partie Ouest. Le Jurassique montre un pendage général de 3° à 8° vers NNO-NO, alors que le Crétacé inférieur, à pendage modéré vers SE, est d'une structure synclinale, dont l'axe est localisé près du cours principal du Fiherenana.

A la surface, le Jurassique à l'Est de la faille comprend de l'Ouest à l'Est, des grès continentaux grossiers ou à grains moyens, de teinte grise foncée et riches en mica (groupe de l'Isalo supérieur), des calcaires ou grès calcaires alternant avec des silts (Jurassique moyen marin) et des grès continentaux grossiers, rougeâtres et riches en grains quartzeux (groupe de l'Isalo moyen).

La zone caractérisée par la présence des collines isolées correspond aux dépôts marins du Jurassique moyen. La forme plate de leur sommet se traduit par le fait que les dépôts calcaires durs et compacts dans l'alternance résistent bien à l'effet de l'érosion. Une documentation existante décrit qu'à 6km au Sud de Sakaraha un bel atoll fossile de 300m de diamètre est très bien conservé. Les collines isolées feraient donc partie de ces atolls.

Les formations de Maninday (altitude: 625m) où un forage d'essai a été exécuté pour la présente Etude, appartiennent au groupe de l'Isalo moyen. Elles ont, jusqu'à 72m de profondeur, une abondance de grains quartzeux avec des grès grossiers ou conglomératiques rougeâtres, silts et grès.

A l'Ouest de la faille d'Ilovo, on trouve, en contact avec celle-ci, des grès calcaires avec intercalations marneuses ou argileuses (Jurassique supérieur marin), mais plus à l'Ouest, les formations du Crétacé inférieur constituées essentiellement de grès continentaux sont dominantes.

Les dépôts marins du Quaternaire reposant à l'intérieur de la cuvette et aux lits des cours d'eau sont d'une épaisseur de quelques mètres, selon notre sondage électrique. Un document disponible décrit qu'une grande quantité de sables et de graviers font invasion dans le réseau du Fiherenana en saison humide, par suite au dévastement importante depuis ces dernières années de la forêt d'Analavelona. Les grès continentaux, peu cohérents puisqu'ils n'ont pas subi de diagenèse, sont facilement érodés, ce qui nous permet d'assister par endroits dans la cuvette aux affleurements d'éboulis. Pourtant, on ne sait exactement la raison pour laquelle, en dépit de ce phénomène, les dépôts fluviaux sont peu épais dans la cuvette.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

A Maninday, situé en dehors de la cuvette, le forage test qu'on a effectué pour la présente Etude a mis en évidence que les silts ou grès, répartis dans une profondeur inférieure à 44m, jouent le rôle de couches imperméables de façon à maintenir aquifères les formations gréseuses grossières reposant sur ces premiers. Le niveau statique se situe aux environs de -16m du niveau du sol. Les eaux ne seront presque pas captives, car leur niveau réagit même à une faible quantité de précipitations.

A Sakaraha, au coeur de la cuvette, il existe 4 puits à une profondeur de 8 à 32m qui touchent les grès du groupe de l'Isalo moyen. Le niveau statique est de -7,5 à -11m du niveau du sol avec une légère variation saisonnière. L'observation étalée sur une longue période concernant un puits profond de 32m montre qu'à la différence de ceux de Maninday le niveau d'eaux souterraines ne sont pas tellement sensibles aux précipitations.

Au Nord de Sakaraha, on trouve un endroit où le plan de stratification du Jurassique moyen marin constitué des calcaires ou grès calcaires alternant avec des silts permet la résurgence d'eaux souterraines. Ces eaux ainsi ressorties alimentent des cours d'eau.

d) Qualité de l'eau souterraine

En outre du faible nombre des puits, les valeurs qu'on a pu obtenir au terme de l'analyse tombant sur les proximités du centre du diagramme, il est pratiquement impossible de classer la qualité des eaux de la zone considérée. Leur potabilité est avérée toutefois bonne avec leur teneur en chlore et conductibilité électrique bien faibles.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

A l'Est au delà de la faille d'Ilovo, les formations des grès grossiers continentaux de l'Isalo moyen offrent la plus grande potentialité de développement. Au forage de Maninday, le débit a été de 360 à 480l/mn. avec débit spécifique de 43,95l/mn./m. La qualité de l'eau est excellente. De même, l'essai de pompage sur un puits de Sakaraha (profondeur: 32m) nous a permis d'obtenir 400l/mn. pour le débit pompé et 150l/mn./m pour la capacité spécifique. De ce fait, les formations des grès grossiers continentaux de l'Isalo moyen semblent pouvoir constituer des nappes aquifères de haute productivité.

Quant à la partie Ouest au delà de la faille, les grès continentaux du Crétacé inférieur qui affleurent largement sur le versant Est du massif d'Analavelona peuvent être aquifères, mais l'exploitation des nappes est gênée par la présence du système Jurassique marin recouvrant celles-ci à la partie inférieure du versant. Par ailleurs, les marnes accompagnant le Jurassique moyen marin peuvent dégrader la qualité de l'eau s'il s'agit des nappes situées au niveau plus bas.

7.3.7 Bassin de la Sakondry

a) Relief

La zone représente une plaine longue et étroite, large de 7 à 8km au long du cours de la Sakondry s'écoulant tout droit du Nord au Sud. La plaine et le plateau de Belomotra-Vineta de l'Ouest sont jalonnés par une falaise à hauteur relative de 100m et par une série de glacis de talus. Le tracé cartographique de la limite entre le massif et le versant Est ne peut pas être facilement distingué.

Pendant la saison sèche, la rivière de Sakondry perd ses eaux en aval. A la rive gauche de l'embouchure, une arête se dresse de direction NE-SO de façon à former une zone marécageuse, en limitant la largeur de l'Onilahy.

b) Géologie

Compte tenu de son itinéraire presque rectiligne, la Sakondry semble dominée par la faille. La succession stratigraphique ne présente pas d'écart important entre les deux côtés de la faille.

La falaise à l'Ouest de la Sakondry présente des affleurements, à pendage modéré vers l'Ouest, du système du Crétacé inférieur fossilifère, constitué de grès, de grès calcaires, de calcaires et de grès marins, sur lesquels reposent des bancs basaltiques. Par contre, entre les environs du lit fluvial et le massif Est, on trouve largement et toujours à pendage Ouest, des grès calcaires jaunâtres ou calcaires du système Jurassique moyen ainsi que, en dessous, des grès blancs à grain moyen (groupe de l'Isalo moyen) ou grès bruns rougeâtres grossiers (groupe de l'Isalo supérieur). Les grès calcaires ou calcaires du Jurassique moyen sont solides, alors que les groupes de l'Isalo moyen et supérieur sont peu cohérents.

Dans le fond de la gorge, les dépôts fluviatiles sont généralement peu épais et le Jurassique affleure le plus souvent directement sur le lit fluvial.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

Dans la zone, les puits sont rares, du fait que les besoins domestiques en eau sont satisfaits par l'eau de la rivière. A Bereketa (altitude: 362m), en amont de la Sakondry, il existe un puits profond de 8,4m. Ce puits, équipé d'une pompe électrique, ne fonctionne plus actuellement. Il atteint probablement l'eau libre dans les dépôts fluviaux du Quaternaire recouvrant le Jurassique moyen. Le niveau d'eau ne varie pas sensiblement entre les saisons sèche et humide.

Le marais sur la rive gauche de l'embouchure semble alimenté d'eaux souterraines ressortant des calcaires du système Jurassique moyen qui constituent l'arête dressée du Nord-Est au Sud-Ouest.

d) Qualité de l'eau souterraine

Un seul échantillon a été prélevé à partir d'un puits peu profond, situé près de la ligne délimitant la Sakondry et la Taheza. Cette eau, non captive et provenant du groupe de l'Isalo moyen, ne présente que des faibles valeurs de teneur en chlorure et de conductibilité électrique.

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

A l'Ouest de la Sakondry, on ne peut attendre de nappes aquifères potentielles des couches de pendage Ouest peu alimentées. Quant aux dépôts de talus s'étalant au pied de la falaise sur la bordure Ouest de la plaine, ils pourront permettre des captages d'eaux libres mais avec un débit modeste.

D'autre part, dans le massif à l'Est de la Sakondry, sont largement répandus les grès à grains moyens ou grossiers de l'Isalo moyen ou supérieur, très intéressants pour le développement, mais ils sont légèrement recouverts, en partie inférieure du flanc, par des formations marines du Jurassique. De ce fait, il faut forer et pénétrer ces formations marines, assez dures d'ailleurs, pour aboutir à des nappes exploitables.

7.3.8 Bassin de la Taheza

a) Relief

C'est une plaine étendue dans un couloir de la vallée de la Taheza coulant selon les directions NNE-SSO. Les pentes douces des massifs montagneux qui l'entourent ne permettent pas de distinguer la limite séparant la plaine et les massifs. Le massif, au sommet plat et au versant escarpé, s'élargissant du Nord-Est au Sud-Ouest limite la largeur de l'Onilahy.

La Taheza maintient même pendant la saison sèche une abondance d'eau et permet l'irrigation d'une grande superficie de rizières aux alentours de sa bouche.

b) Géologie

Les massifs entre lesquels la Taheza s'écoule sont constitués des terrains des groupes de l'Isalo moyen et inférieur dont la répartition est déterminée par un grand nombre de failles s'étalant vers l'Est de la zone. On assiste aux affleurements de l'Isalo moyen en graben et de l'Isalo inférieur en horst.

L'arête se dressant sur la rive gauche du delta de la Taheza est un horst du groupe de l'Isalo inférieur, constitué à stratification entrecroisée des grès grossiers un peu conglomératiques. Ces grès continentaux sont silicifiés, donc plus cohérents par rapport à ceux appartenant à l'Isalo moyen et supérieur, ce qui peut expliquer l'étroitesse locale de la largeur de l'Onilahy et la pente escarpée du versant montagneux. Les formations sont de teinte brune rougeâtre ou blanche jaunâtre et caractérisées par les intercalations des couches peu épaisses mais fort consolidées par concentration ferrugineuse.

Le village d'Analamary (altitude: 544m) où un forage test a été exécuté pour la présente Etude est situé au bout de l'amont de la Taheza. On trouve dans ses environs des grès grossiers de teinte rouge brunâtre de l'Isalo moyen. Le niveau supérieur d'une épaisseur de 63m est formé de grès grossiers brunâtres, alors que le niveau moyen comprend essentiellement des grès à grains moyens gris violâtres ou tout simplement gris. Les grès à grains moyens du niveau inférieur peuvent être donc rapportés à l'Isalo inférieur. Les dépôts fluviaux se répartissent dans le lit de la Taheza, mais leur épaisseur reste inconnue.

c) Niveau et régime de l'eau souterraine

De nombreux villages de la zone utilisant principalement l'eau de la rivière, on ne peut se procurer des renseignements sur le niveau et sur le régime des eaux souterraines.

Le forage test effectué à Analamary a démontré qu'il y a dans les formations de l'Isalo moyen un certain nombre de sections dont la conductibilité électrique est avérée faible. La nappe artésienne la plus possible se situe dans les grès grossiers de l'Isalo inférieur étalés dans une profondeur comprise entre 160 et 190m. Le niveau statique de l'eau est de -35m à partir du niveau du sol. Ce point se trouvant près de la crête de partage séparant la Taheza et le Fiherenana, il est raisonnable de considérer que les eaux en question viennent du Nord-Est.

A Bezaha (altitude: 130m) qui n'entre pourtant pas dans le cadre de notre étude, il existe 2 puits d'une profondeur respective de 48m et 168m, forés pour la recherche de pétrole, avec résurgence d'eau venant des grès grossiers de l'Isalo inférieur. La température élevée, 40 à 45°C, permet de l'exploiter comme une source thermique d'intérêt public. La documentation existante rapporte simplement la résurgence d'eaux thermales au long de la faille de direction NE-SO sans mention de l'origine thermique.

d) Qualité de l'eau souterraine

Nous avons procédé à l'analyse de deux échantillons d'eaux libres (Analamary et Antanimora) et un échantillon d'eaux captives du forage d'Analamary pour examiner la potabilité et les caractéristiques de teneur ionique de ces eaux. Leur qualité chimique pour la potabilité est bonne avec teneur en ions comme ci-dessous:

Endroits	Eaux libres	Eaux captives
Analamary Antanimoro	Type IV Type II	Type II

e) Potentiel de développement de l'eau souterraine

A l'Ouest de la Taheza, le groupe de l'Isalo moyen, formé essentiellement de grès continentaux, témoigne d'une grande capacité aquifère qui est pourtant bien restreinte à cause d'une zone de recharge insuffisante.

A l'Est de la Taheza, s'étalent largement des formations gréseuses grossières ou conglomératiques de l'Isalo moyen et inférieur. On suppose toutefois que le groupe de l'Isalo inférieur n'est pas nécessairement perméable de façon satisfaisante, car l'espace entre les grains est encombré de matières silicifiées. Par contre, les grès de l'Isalo moyen peuvent constituer des nappes aquifères très positives, selon les résultats d'un essai de pompage mené au sondage expérimental à Analamary. Les débits pompé et spécifique ont été respectivement de 360 à 600l/mn. et de 41,76l/mn./m. Une étude tectonique devra pourtant précéder l'action de développement, étant donnée la complexité de grabens et de horsts et la pauvreté de succession des formations.