

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du

Diplôme de Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée
Intitulé

**EVALUATION DES RESSOURCES EN EAUX DANS LA
REGION ANALAMANGA EN VUE D'UNE GESTION INTEGREE
DES RESSOURCES EN EAU**

Présenté par : **DANIEL ALI BANDAR**

Soutenu le 19 Décembre 2006

Devant le jury composé de :

RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur Titulaire
Chef du Département de Physique

Président

RAKOTOARIMANANA, Ingénieur en Chef
Conseiller Technique au Ministère de l'Energie et des Mines

Rapporteur

RATSIMBAZAFY Jean Bruno, Professeur Titulaire
Chercheur au Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'I.O.G.A

Examinateur

RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Docteur
Chercheur associé de l'I.O.G.A

Examinateur

ANNEE 2006



M.E.M

Département Hydrogéologie

REMERCIEMENTS

En préambule de ce mémoire, je souhaite adresser ici tous mes remerciements au département de physique, faculté des sciences, université d'Antananarivo et aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont également contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Singulièrement ; mes vifs remerciements au Professeur RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, qui a accepté de gaîté de cœur de présider honorablement le Jury.

Mes vifs remerciements au Professeur RATSIMBAZAFY Jean Bruno, qui a bien voulu examiner ce travail.

De même, au Professeur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien, Directeur de l'IOPA et Responsable de la Formation en MSTGA qui nous a suivi et encadré tout au long de cette formation.

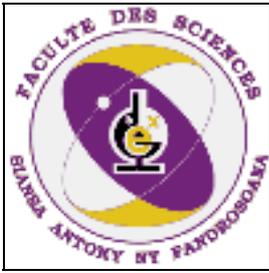
Puis, Monsieur le Conseiller RAKOTOARIMANANA, Ingénieur, à qui nous demandons de trouver ici nos remerciements. Grâce à sa collaboration ce travail est rendu possible.

Ensuite, Monsieur le Docteur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, pour l'aide, les conseils et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

J'exprime ma gratitude à tout le personnel de l'IOPA, au secrétariat ; leur compétence, leur disponibilité, leur sérénité, ont effacé en moi les heures de lassitude et permis l'achèvement de ce travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Je ne saurai terminer sans souligner l'enrichissement personnel que m'a apporté la tâche, parfois complexe, d'assembler les différentes parties de ce document.



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du

Diplôme de Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée
Intitulé

**EVALUATION DES RESSOURCES EN EAUX DANS LA
REGION ANALAMANGA EN VUE D'UNE GESTION INTEGREE
DES RESSOURCES EN EAU**

Effectué au sein du Ministère de l'énergie et des Mines

Présenté par : DANIEL ALI BANDAR

Soutenu le 19 Décembre 2006

Devant le jury composé de :

RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur Titulaire
Chef du Département de Physique

Président

RAKOTOARIMANANA, Ingénieur en Chef
Conseiller Technique au Ministère de l'Energie et des Mines

Rapporteur

RATSIMBAZAFY Jean Bruno, Professeur Titulaire
Chercheur au Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'I.O.G.A

Examineur

RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Docteur
Chercheur associé de l'I.O.G.A

Examineur

ANNEE 2006



M.E.M

Département Hydrogéologie

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION 1

Première Partie : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. SITUATION ADMINISTRATIVE.....	3
II. CADRE PHYSIQUE.....	5
II.1 CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE.....	5
II.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	6
II.3 CONTEXTE CLIMATIQUE.....	7
II.4 CONTEXTE HYDROLOGIQUE.....	9
II.5 SOLS ET VEGETATION.....	11

Deuxième Partie : EVALUATION DES BESOINS EN EAU

I. BESOIN EN AEP.....	12
I.1 APERÇU DE LA SITUATION.....	12
I.2 POPULATION ET DEMOGRAPHIE.....	13
I.3 VALEUR DE L'ESTIMATION (2006).....	15
II. BESOINS AGRICOLES.....	16
II.1 VALEUR DE L'ESTIMATION.....	16
II.2 CARACTERISTIQUES GLOBALES.....	17
II.3 SUPERFICIE AGRICOLE.....	17
II.4 AMENAGEMENTS HYDROAGRIQUES.....	19
III. BESOINS EN ELEVAGE.....	21
III.1 CARACTERISTIQUES GLOBALES.....	21
III.2 VALEUR DE L'ESTIMATION.....	22
IV. BESOINS EN INDUSTRIE.....	22
V. VALEUR DE L'ESTIMATION.....	22

Troisième Partie : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU

I. RESSOURCES EN EAUX DE SURFACE.....	23
I.1 CARACTERISTIQUES DES EAUX DE SURFACE.....	23
I.2 DEBITS D'ETIAGES DES COURS D'EAU.....	23
I.2.1 Ikopa :.....	23
I.2.2 Autres rivières du bassin.....	24
I.2.3 Les lacs principaux.....	24

II. RESSOURCE EN EAUX SOUTERRAINES.....	25
II.1 LES NAPPES DANS LES ALLUVIONS.....	25
II.1.1 Le réservoir alluvial.....	26
II.1.1.1 Définition.....	26
II.1.1.2 Forme et puissance.....	26
II.1.2 Hydrogéologie de la plaine.....	27
II.1.2.1 Piézométrie.....	27
II.1.2.2 Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.....	28
II.1.2.2.1 La transmissivité (T).....	28
II.1.2.2.2 Le coefficient d'emmagasinement(S).....	28
II.1.2.2.3 La diffusivité hydraulique.....	28
II.1.2.3 Relation hydrodynamique avec les cours d'eau.....	29
II.1.2.4 Mécanisme hydrodynamique.....	29
II.1.2.4.1 Alimentation des nappes.....	29
II.1.2.4.2 Exhaure de la nappe.....	20
II.1.2.5 Balance hydrodynamique de la nappe en période d'étiage.....	30
II.1.3 Ressources potentielles et ressources exploitables.....	30
II.1.3.1 Ressources exploitables par secteurs.....	30
II.1.3.1.1 Secteur 1.....	31
II.1.3.1.2 Secteur 2.....	31
II.1.3.1.3 Secteur 4/5.....	31
II.1.4 Les vallées de la Mamba et de l'Ampasimbé.....	31
II.2 LES NAPPES DANS LES LATERITES.....	32
II.2.1 Définition.....	32
II.2.2 L'eau dans le complexe latéritique.....	32
II.2.3 Caractéristiques.....	32
II.3 LES NAPPES DES ROCHES VOLCANIQUES.....	33
III. BILAN HYDRIQUE DE LA REGION.....	33

**Quatrième Partie : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET SCHEMA DIRECTEUR
D'USAGE DE L'EAU**

I. EAUX DE SURFACE.....	34
I.1 LES RESSOURCES PRINCIPALES EN EAUX DE SURFACE... ..	34
I.2 LES RESSOURCES COMPLEMENTAIRES EN EAUX DE SURFACE	34
I.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX DE SURFACE ...	34
I.3.1 Ikopa et Lac Mandroseza.....	34
I.3.2 Qualité des eaux superficielles pouvant éventuellement servir d'appoint.....	36
II. EAUX SOUTERRAINES.....	36
II.1 RESSOURCES DES NAPPES ALLUVIALES.....	36
II.1.1 Localisation, ouvrage, quantité et qualité des ressources.....	36
II.1.1.1 Localisation.....	36
II.1.1.2 Ouvrage.....	37
II.1.1.2.1 Secteur 1 : Forage F3.....	37
II.1.1.2.2 Secteur 2 : forage F2.....	38
II.1.1.2.3 Secteur 3.....	38

II.1.1.2.4 Secteur 4/5 : Forage F6.....	39
II.1.1.2.5 Secteur 6 : Forage F9.....	40
II.1.2 Quantité des ressources par secteur.....	41
II.1.2.1 Qualité physique, chimique et bactériologique de l'eau des nappes alluviales.....	41
II.2 RESSOURCES EN EAU DES LATERITES.....	42
III. SCHEMA DIRECTEUR D'USAGE DES RESSOURCES EN EAU	43
CONCLUSION GENERALE.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTES DES ABREVIATIONS

AEP : Alimentation en Eau Potable
ANDEA: Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement
BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière
ETP : évapotranspiration potentielle
FTM : Foibe Taon-tsaritanin'i Madagasikara
GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPI : Grand Périmètre Irrigué
INSTAT : Institut National de la Statistique
IOGA : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
IPM : Institut Pasteur de Madagascar
JIRAMA: Jiro sy Rano Malagasy
MEM: Ministère de l'Energie et des Mines
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
PPI : Petit Périmètre Irrigué
RFM : Réserve Facilement Mobilisable
RGPH : Recensement Général de la Population Humaine
SIGM : Système d'Information Géologique et Minier

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition de la superficie par sous-préfecture.....	3
Tableau 2 : Evolution de la température mensuelle de la région Analamanga.....	8
Tableau 3 : Evolution de la pluviométrie mensuelle de la région Analamanga	8
Tableau 4 : Débits moyens annuels (de 1955 à 1998)de quoi	11
Tableau 5: Consommation en eau potable.....	12
Tableau 6: Répartition spatiale de la population.....	13
Tableau 7: Evolution de la population.....	14
Tableau 8: Taux d'accroissement naturel.....	15
Tableau 9: Superficie agricole et surface exploitée en 2001.....	16
Tableau 10: Répartition des superficies cultivées par type de culture	17
Tableau 11: Répartition des superficies par catégories de culture.....	18
Tableau 12: Grands périmètres irrigués.....	19
Tableau 13: Liste des PPI.....	20
Tableau 14 : Estimation des besoins en eau en agriculture.....	20
Tableau 15: Evolution du nombre de cheptel au niveau national.....	21
Tableau 16: Evolution du nombre de cheptel dans la province d'Antananarivo.....	22
Tableau 17 : Estimation des besoins en élevage.....	22
Tableau 18 : Récapitulation des besoins en eau	22
Tableau 19: Débits d'étiages des principaux rivières du bassin.....	24
Tableau 20 : Transmissivité.....	28
Tableau 21 : Récapitulation des caractéristiques hydrodynamiques	29
Tableau 22 : Essai de reconstitution de la balance entre apports, transits, et exhaures en période d'étiage.....	30
Tableau 23 : Bilan hydrique.....	33
Tableau 24 : Eau brute du Lac Mandrozeza.....	35
Tableau 25: Eau brute de l'Ikopa.....	35
Tableau 26 : Analyse bactériologique.....	36
Tableau 27 : Analyse physico-chimique.....	41
Tableau 28: Analyse bactériologique.....	42
Tableau 29: Caractéristiques chimiques.....	42
Tableau 30 : Usages de l'eau.....	43

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3 : Carte topographique de la zone d'étude.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 4 : Carte hydrographique de la zone d'étude.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5 : Localisation de la nappe de Betsimitatatra.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 6 : Représentation des différents barrages possibles.....</i>	<i>43</i>

INTRODUCTION

1,5 milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable dans le monde (le quart de la population mondiale) et plus de 2 milliards de personnes ne disposent pas d'un assainissement approprié. A l'heure où les pays développés (au Québec par exemple) utilisent en moyenne 420 litres d'eau par personne chaque jour, dans plusieurs pays du Sud c'est seulement une trentaine de litres par personne par jour qui sont disponibles, tandis que dans certains pays comme le Sahel, on arrive difficilement à trouver 10 litres d'eau. De plus, avec l'augmentation rapide de la population, la quantité d'eau disponible par personne s'en trouvera réduite. Ainsi, on prévoit que près de 65 pays (7 milliards de personnes) manqueront d'eau d'ici 2050, soit 65 % de la population mondiale.

Compte tenu de ce constat, Madagascar doit s'alarmer. Car maintenant même l'accès à l'eau potable est problématique à Madagascar. Sur la base d'une enquête représentative au niveau national (Enquête Permanente auprès des Ménages), il est estimé qu'en 1999, moins d'un cinquième de la population nationale a eu accès aux sources d'eau potable propre. Moins de 60% de la population urbaine et seulement moins de 10% de la population rurale peuvent avoir accès à l'eau.

De grands changements politiques sont entrepris pour améliorer l'accès à l'eau de qualité améliorée. Un « Code de l'Eau » a été adopté récemment par le Gouvernement. Car la maîtrise de l'eau en vue de la satisfaction des besoins de tous les utilisateurs, dans le cadre d'un développement rapide et durable du pays s'avère indispensable. L'utilisation des ressources en eau nécessite obligatoirement un arbitrage et une définition des priorités face à des besoins de plus en plus importants pour éviter autant que possible des conflits d'usage sur l'exploitation d'une même ressource en eau.

Pour la région d'Analamanga, l'industrialisation, l'urbanisation et l'agriculture intensives ont entraîné une importante détérioration de la qualité des eaux. Face à ces problèmes et au caractère hautement prioritaire du secteur de l'eau et de l'assainissement, il est nécessaire de mieux connaître les ressources disponibles sur place que ce soit les ressources de surface ou souterraines. Pour ce faire, ce mémoire nous apporte une analyse sur l'évaluation des ressources en eaux dans la région d'Analamanga. Il comporte quatre grandes parties à savoir : la présentation de la zone d'étude ; l'évaluation des besoins en eau ; l'évaluation des ressources en eaux et enfin les résultats et interprétations avec une proposition d'un schéma directeur de la gestion en eau.

PARTIE I
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. SITUATION ADMINISTRATIVE

De point de vue administratif, notre zone d'étude est sous la Direction Inter-Régionale du Développement Rural d'Antananarivo. Elle se décompose en 8 districts et 122 communes.

Cette région est bordée à l'Ouest et au Nord par la Région de Bongolava, à l'Est par la Région d'Alaotra Mangoro et au Sud par la Région de Vakinankaratra et au Sud Ouest par l'Itasy.

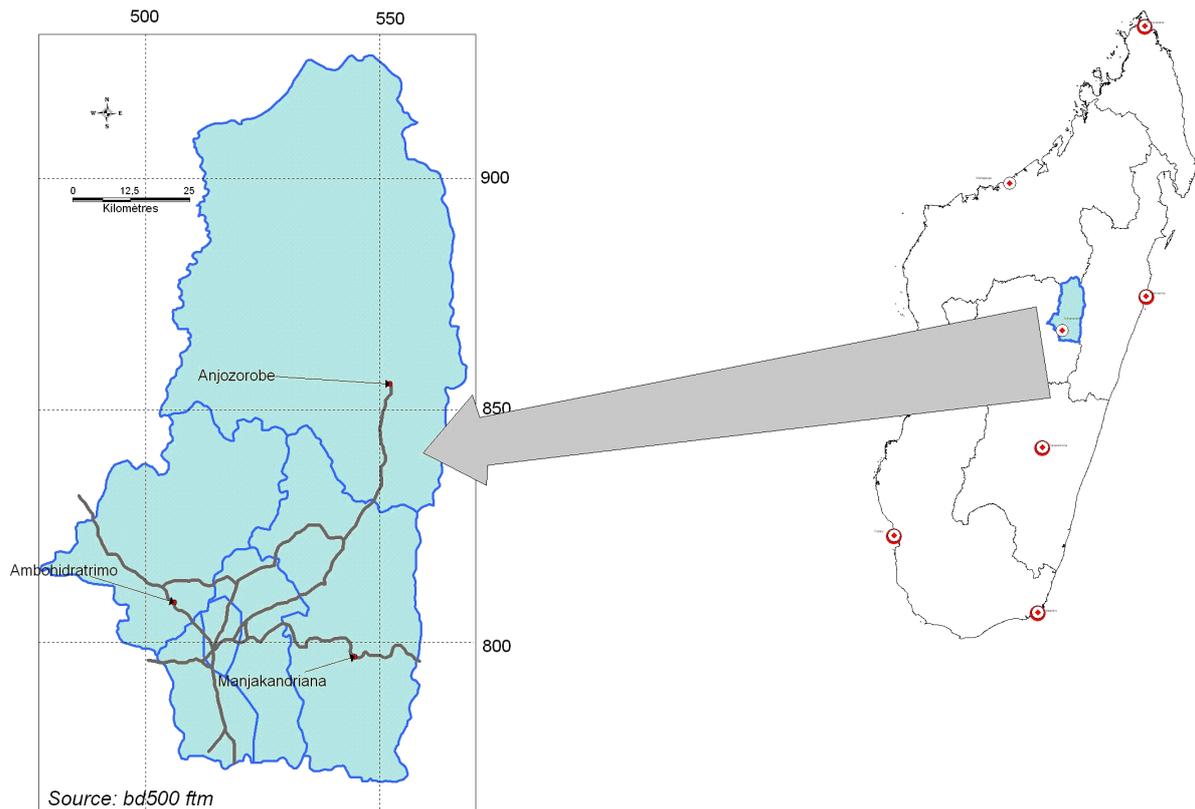


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Tableau 1 : Répartition de la superficie par district

Région	Sous-préfecture	Superficie (km ²)	Communes	Nombre
A N A L A M A N G A	Antananarivo Renivohitra	107	6 Arrondissements : Antananarivo I à VI	6
	Antananarivo Antsimondrano	379	Ampitatafika, Androhibe, Ambohidrapeto, Itaosy, Andranonahoatra, Tanjombato, Ankaraobato, Andoharanofotsy, Soalandy, Antanetikely, Fenoarivo, Ambohijanaka, Bongatsara, Tsiafahy, Ambalavao, Ambatofahavalo, Bemasoandro	17
	Antananarivo Avaradrano	545	Alasora, Ankadikely-Ilafy, Ambohimangakely, Masindray, Ambohimanambola, Sabotsy-Namehana, Ambohimalaza-Miray, Anjeva-gara, Fieferana, Ambohimanga-Rova, Talatavolonondry, Ankadinandriana	12
	Andramasina	1416	Andramasina, Sabotsy- Ambohitromby, Mandrosoa, Alatsinainy-Bakaro, Ambohimiadana, Fitsinjovana-Bakaro, Alarobia, Sabotsy-Manjakavahoaka, Anosibe-Tsimiloarano, Andohariana, Tankafatra	11
	Anjozorobe	4292	Anjozorobe, Ambongamarina, Mangamila, Betatao, Amboasary, Ambatomanoina, Ambohibary, Analaroa, Betatao, Beronono, Marotsipoy, Amboasary, Antanetibe	12
	Manjakandriana	1718	Manjakandriana (CU), Mantasoa, Sambaina, Ambohibary, Ambatomanga, Alarobia, Miadanandriana, Ambanitsena, Ambohitrandriamanitra, Nandihizana, Ambatomena, Anjepy, Ambohitseheno, Ankazondandy, Ambohitrolomahitsy, Sadabe, Ambatoloana, Ambohitrony, Betoho, Antsahalalina, Ranovao, Soavinandriana, Merikanjaka	23
	Ambohidratrimo	1418	Ambohidratrimo, Iarinarivo, Fiakarana, Talatamaty, Mahabo, Imerimandroso, Antsahafilo, Ambato, Mahitsy, Mananjara, Ampanotokana, Antanetibe, Anjanadoria, Ambohitrimanjaka, Ambohimasina, Ampangabe, Fiadanana, Tsaramasoandro, Mahereza, Mahazaza, Ambohipihaonana, Manjakavaradrano, Anosiala, Avaratsena, Ivato Firaisana, Ivato aéroport	27
	Ankazobe	7574	Ankazobe, Talata-Angavo, Fiadanana, Ambohitromby, Antotohazo, Morondro, Maridaza, Amborotarakely, Antakavana, Tsaramasoandro, Kiangara, Miantso, Fihaonana, Mahavelona, Maridaza	15
Total.	8 districts	17449		122

(Source : Ministère de la Décentralisation et du Budget, Inventaire des Fivondronana de Madagascar 2001)

L'ensemble de la Région s'étend sur une superficie de 17449 km², ce qui présente 31% de la province d'Antananarivo et 3,3% de la superficie de Madagascar. Elle se caractérise par :

- ◆ sa situation de métropole nationale : à la fois capitale de Madagascar et centre politique, administratif et économique du pays. Elle est reliée aux autres faritany par des routes nationales, des lignes de chemin de fer et des liaisons aériennes.
- ◆ sa géographie spécifique constituée de hauts plateaux, de collines plus ou moins escarpées et de massifs volcaniques.

II. CADRE PHYSIQUE

II.1 CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE

La zone d'étude fait partie de ce que l'on appelle les Hautes Terres ou Hauts Plateaux par rapport à l'ensemble de l'île.

- Les Hauts Plateaux situés au Nord et à l'Ouest dépassent l'altitude de 1 500 mètres, ils sont séparés par des vastes vallées drainées par deux fleuves : la Betsiboka et l'Ikopa.
- Le Centre se caractérise par l'escarpement de faille de l'Angavo et le paysage des collines de l'Imerina Est. A l'Ouest, il y a les plaines d'Antananarivo, dont l'aménagement a commencé au temps de la royauté Merina.
- Le Sud a une altitude plus élevée. C'est une région volcanique comprenant plusieurs bassins aménagés : Ambatolampy.
- La région, couvrant une superficie de 17 449km², présente un relief morcelé dont l'altitude varie de 600 à 1 700 m.
- Le centre est caractérisé par ses collines escarpées et sa plaine inondable.
- L'Est présente un paysage très varié. Le district de Manjakandriana est formé par une succession des collines coupées par un chaos de boules granitiques. Cette cascade de dômes s'estompe au niveau du district d'Andramasina.
- Au Nord, le district d'Ankazobe fait partie du vaste ensemble des Tampoketsa, surface d'érosion monotone, uniforme, interrompue par de larges et longues vallées suivies par des rivières au fond plat et bordées de forêts galeries. Par contre, le district d'Anjozorobe (Nord-Est) présente un paysage plus ouvert avec des vallées séparant les tanety.

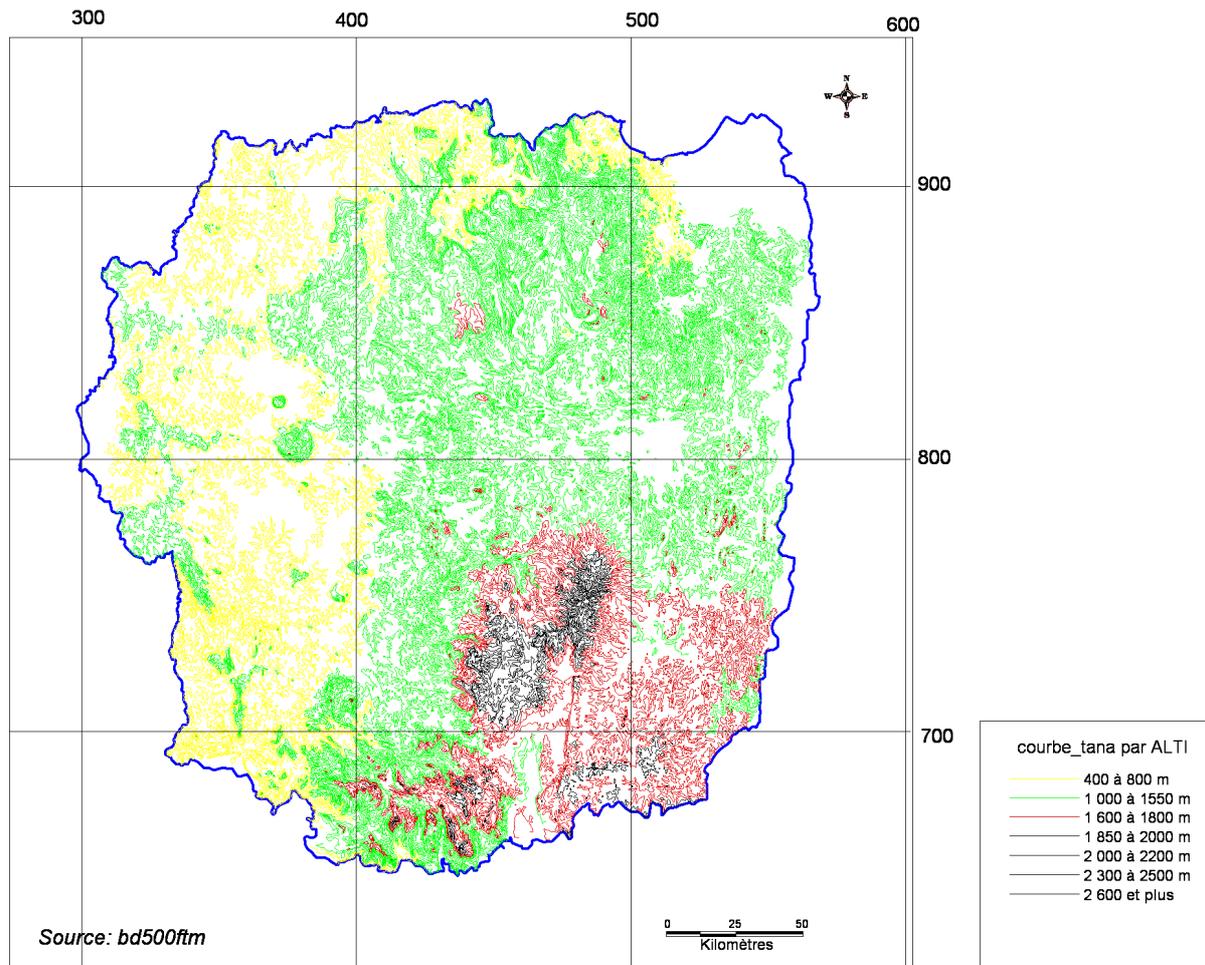


Figure 2 : carte topographique de la région d'Antananarivo

II.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le sous-sol de la région, de par sa situation au niveau de l'axe central de Madagascar, est généralement constitué par :

- ◆ les granites et migmatites du Tampoketsa (Nord)
- ◆ l'infra-graphite du groupe Ambodiriana, caractéristique du Moyen Ouest de la Province d'Antananarivo
- ◆ le volcanisme néogène à quaternaire de l'Itasy
- ◆ le néogène lacustre et granites du Nord Est
- ◆ la série schisto - quartzo - calcaire du Sud

Sur ce sous-sol, des formations diverses se sont constituées :

- ◆ les massifs quartziques sont les roches sédimentaires (sable) ayant subi une métamorphisation

◆ les massifs granitiques, généralement dispersés sur la bordure occidentale du massif volcanique de l'Ankaratra dans l'Ouest et dans le Sud, le relief sur socle à sol ferrallitique squelettique.

◆ les hautes pénélaines latéritiques ou hautes surfaces d'érosion non enrochées sur roches acides. Les pénélaines résultant de l'érosion rencontrent des argiles latéritiques non concrétionnés.

◆ les pénélaines latéritiques en surface d'aplanissement d'altitude moyenne sur socles acides. Ces formations caractérisent la partie Ouest de la Région (zones comprises dans ce qu'on appelle, le Moyen Ouest de Madagascar, dont l'altitude varie de 800 à 1 000m).

◆ le relief granito- gneissique épars sur hautes terres latéritiques ondulées.

◆ les cuvettes et plaines alluviales :

◆ les cuvettes lacustres qui sont dues à des lavages volcaniques, des coulées de lave ayant obturé des vallées et retenus, ainsi que les eaux qui s'accumulaient en arrière. Certaines cuvettes étaient autrefois reliées entre elles. Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important pour l'occupation humaine.

◆ les plaines alluviales le long des fleuves généralement aménagés en rizières.

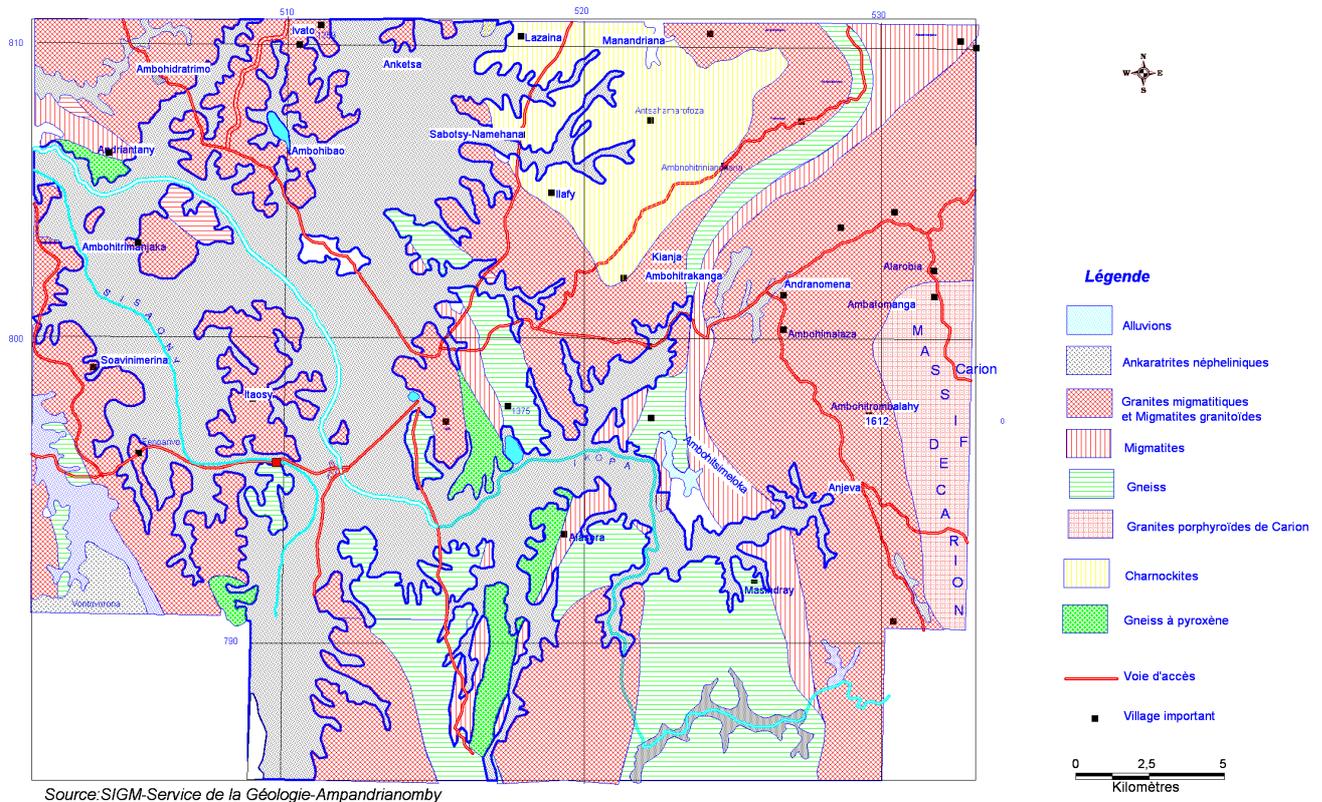


Figure 3 : carte géologique de la région Analamanga

II.3 CONTEXTE CLIMATIQUE

La région fait partie du régime climatique tropical d'altitude supérieure à 900m. Elle est caractérisée par une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20° C. Ce domaine climatique englobe l'axe central de la Hautes Terres et couvre une grande partie de la Province d'Antananarivo.

L'année comporte deux saisons bien individualisées : une saison pluvieuse et moyennement chaude, de Novembre à Mars et une autre fraîche et relativement sèche, durant le reste de l'année. Il existe de nombreux sous-climats. Il est même possible que chaque district ou chaque commune ait sa spécificité climatique.

Le climat est caractérisé par les températures et les pluviométries.

II.3.1 Température :

La température de la région est répartie comme suit :

Tableau 2 : Evolution de la température mensuelle de la région

Températures		Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Année 2000	T°max	26,6	25,3	24,8	26,5	24,9	20,7	19,8	21,4	23,9	26,6	25,5	26,3
	T°min	17,1	16,6	16,1	15,7	13,9	11,8	11,2	10,7	11,0	13,6	15,4	17,1
	T°Moy	21,9	21,0	20,5	21,1	19,4	16,3	15,5	16,1	17,5	20,1	20,5	21,7
Année 2001	T°max	26,3	27,0	26,5	26,5	24,5	21,3	20,9	21,9	25,2	24,9	27,2	28,4
	T°min	17,9	17,3	17,1	15,7	13,9	11,1	10,8	12,5	12,5	14,0	15,1	17,4
	T°Moy	22,1	22,2	21,8	21,1	19,2	16,2	15,9	17,2	18,9	19,5	21,2	22,9
Année 2002	T°max	27,9	26,0	26,1	23,5	22,6	20,4	22,0	20,2	24,3	25,4	27,8	26,9
	T°min	16,9	17,7	17,6	15,8	14,4	11,8	10,7	10,7	12,2	13,8	16,3	17,1
	T°Moy	22,4	21,9	21,9	19,7	18,5	16,1	16,4	15,5	18,3	19,6	22,1	22,0
Année 2003	T°max	25,7	26,3	26,2	26,2	25,2	21,7	20,1	22,0	23,0	27,6	27,5	27,4
	T°min	17,8	17,2	17,2	15,9	15,7	11,2	10,7	10,5	12,5	14,1	16,2	17,2
	T°Moy	21,7	21,7	21,7	21,0	20,4	16,4	15,4	16,2	17,7	20,8	21,8	22,3
Année 2004	T°max	26,8	26,0	24,5	25,8	23,0	20,1	21,6	22,5	24,6	26,4	26,3	26,0
	T°min	17,8	17,5	17,0	15,5	13,2	11,1	11,2	11,2	13,7	15,6	15,4	17,2
	T°Moy	22,3	21,7	20,7	20,6	18,1	15,6	16,4	16,8	19,1	21,0	20,8	21,6
Année 2005	T°max	26,7	27,7	27,0	26,3	22,8	21,9	20,5	21,0	21,1	24,8	24,1	27,4
	T°min	17,6	17,9	17,6	16,1	14,2	12,5	10,4	10,7	11,6	13,5	15,3	17,4
	T°Moy	22,1	20,3	22,3	21,2	18,5	17,2	14,4	15,8	16,3	19,1	19,7	22,4

Source : Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie d'Antananarivo – Ampandrianomby

La température moyenne de la région se situe entre 14,4 et 22,9°C de 2000 à 2005. La température moyenne maxima est de 22,9°C tandis que le minima est de 14,4°C

II.3.2 Pluviométrie :

La pluviométrie de la est donnée comme suit :

Tableau 3 : Evolution de la pluviométrie mensuelle de la région

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Hauteur	Moy mensuelle
2000	113,5	256,5	142,4	1,4	4,5	4	15,7	0,6	0,5	28,7	189,6	202,4	959,8	80,0
2001	576,5	152,3	45,7	11,3	1,2	1,6	2,1	35,7	0	47,3	31,4	253,3	1158,4	96,5
2002	149,1	286,4	74,5	88,7	108,3	10,6	0,2	1,7	45,2	53,6	161,8	274,6	1254,7	104,6
2003	616,8	125,7	337,2	15,4	17,0	1,3	6,9	0,6	23,1	15,7	112,5	154,1	1426,3	118,8
2004	252,7	247,6	100,1	39,5	3,0	5,6	2,3	23,7	6,6	7,2	145,6	304,9	1138,8	94,9
2005	268,8	223,4	207,8	86,9	13,0	1,6	28,1	5,6	4,1		143,6	271,0	1253,9	114
MOYENNE	329,6	251,3	151,3	40,5	24,5	4,1	9,2	11,3	13,2	30,5	130,7	243,4	1198,6	101,5

Source : Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie d'Antananarivo – Ampandrianomby

La pluviométrie, au point de vue quantité de précipitations annuelles, ne présente pas une grande différence. C'est la répartition dans l'année qui comporte parfois des mois secs (très souvent, d'avril à Octobre)

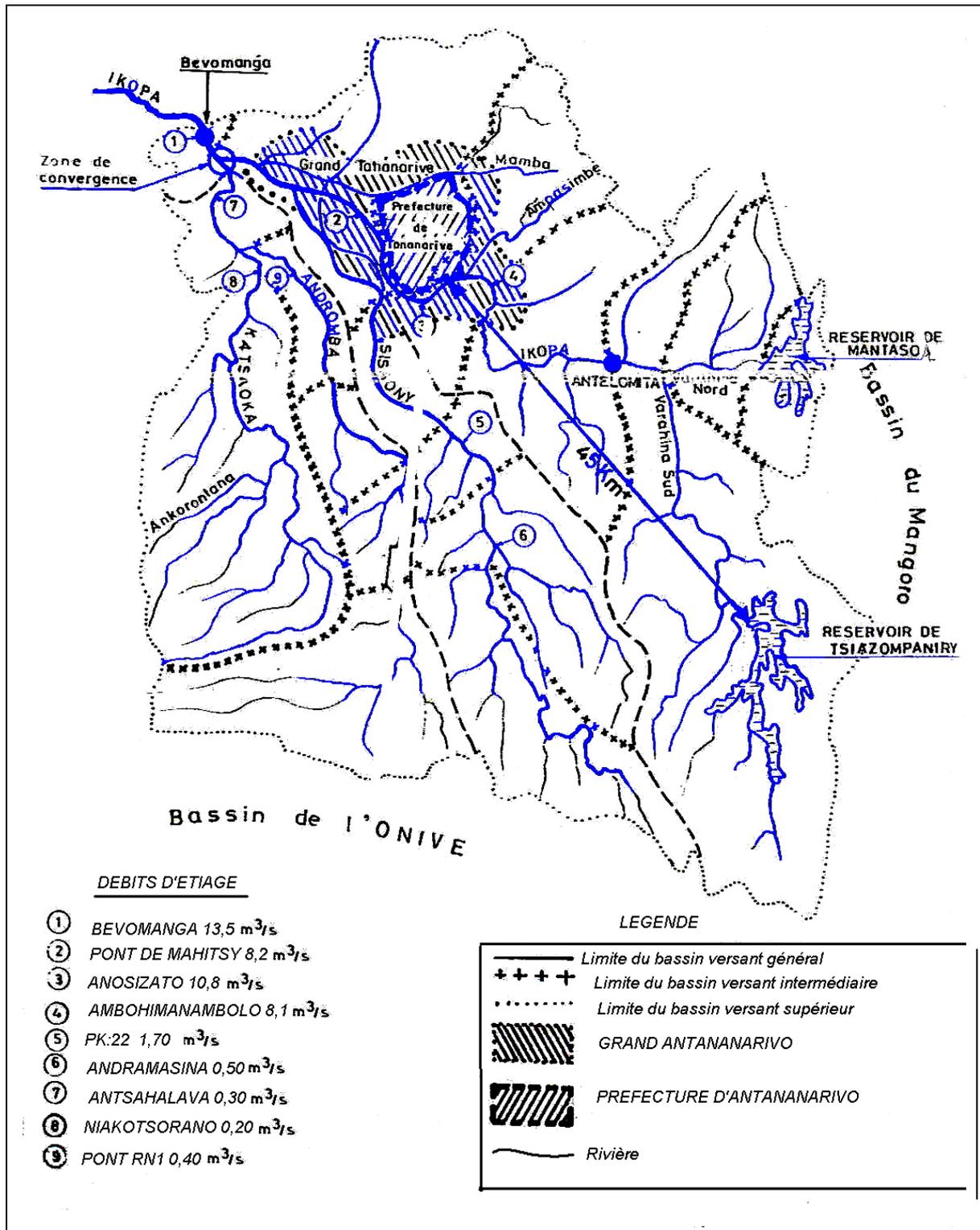
- ◆ d'une part, en augmentant les risques d'inondation pour une même quantité de pluie
- ◆ d'autre part, en réduisant les périodes d'écoulement des rivières

II.3.3 Cyclones

La région fait partie des zones à faible risque climatique. Les perturbations tropicales qui y ont passé sont rarement redoutables. Quelques unes causent néanmoins des dégâts considérables sur l'environnement et sur la vie socio-économique dans la région. : les inondations de la plaine 1954 et 1959, le cyclone CLOTILDE en 1976, GAFILO en 2004

II.4 CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Une grande partie des principaux fleuves de Madagascar traversent la Province d'Antananarivo, entre l'Ikopa et ses affluents (Sisaony, Mamba et Andromba), les cours supérieurs de l'Isandrana, de la Mahavavy, ainsi que de la Betsiboka, généralement dans la région Analamanga, la Mahajilo et ses affluents (la Mania, la Kitsamby, la Sakay), ainsi que le Bas Mangoro et son affluent (Onive), essentiellement dans l'Itasy.



Source: Extrait du document (Approvisionnement en Eau et Assainissement d'Antananarivo, 1973)

Figure 4 : Carte hydrographique de la zone d'étude

Dans l'ensemble, le réseau hydrographique semble dense et assez hiérarchisé. Les données hydrologiques qui donnent les caractéristiques des fleuves et de leurs affluents, ne sont pas suffisamment représentatives pour une éventuelle analyse mathématique et statistique

Tableau 4 : Débits moyens annuels (mesures pluriannuelles de 1955 à 1998)

Fleuve	Station d'observation	Superficie B.V. (km ²)	Débit moyen Annuel (m ³ /s)	module spécifique l/s/km ²
Ikopa	Ambohimanambola	1407	28,5	21,6
	Anosizato	1691	29,7	17,6
Sisaony	Andramasina	318	6,04	19
Andromba	Tsinjony	350	7,73	22

Seule l'Ikopa présente des débits moyens annuels supérieurs à 20m³/s

II.5 SOLS ET VEGETATIONS

II.5.1 Sols

En matière de pédologie, la Région est marquée par la dominance de trois types de sols suivants :

- ◆ les sols ferrallitiques couvrant une grande partie des régions
- ◆ les sols alluviaux, n'occupant qu'une place restreinte, se rencontrent dans les cuvettes, comme les plaines d'Antananarivo

II.5.2 Les végétations

L'ensemble de la Région est caractérisé par la faible superficie couverte de forêt primaire. La dégradation est telle qu'il ne reste plus que quelques lambeaux de forêt, juste à la limite orientale de la Province, à l'Est d'Anjozorobe passant par Ambatolaona jusqu'à Tsinjoarivo, à Ambatolampy et à Tampoketsa (Ankazobe).

Dans les districts de Manjakandriana et d'Anjozorobe existent des zones de boisement en eucalyptus, qui fournissent presque la totalité des besoins en bois de chauffe de la ville d'Antananarivo.

Une grande partie de la zone est constituée d'une zone de savane et de steppe à *Aristida* utilisée comme pâturage.

Dans les bas-fonds, on rencontre des marais à juncs et parfois à Viha, quelques vestiges de forêts galeries qui sont en voie de disparition.

PARTIE II: EVALUATION DES BESOINS EN EAU

L'eau est utilisée pour divers usages. Pour appréhender les interactions et les pressions entre usages, il est nécessaire de comprendre quels sont les *besoins* par rapport à la ressource en eau.

Pour une meilleure estimation de ces besoins, les paramètres suivants doivent être évalués :

- la population (AEP)
- l'agriculture et l'élevage
- et l'industrie

I. BESOINS EN AEP :

On désigne par " alimentation en eau potable " ou " adduction en eau potable " l'ensemble des interventions humaines qui aboutissent à la fourniture d'eau chez le consommateur, à savoir la production d'eau de qualité potable et sa distribution.

Deux unités d'exploitation se distinguent :

La production de l'eau potable. Elle consiste à prélever l'eau " brute " dans le milieu naturel par captage de nappe souterraine ou d'une ressource superficielle (rivière, fleuve, barrage ...), à traiter si nécessaire l'eau prélevée pour la rendre potable, puis à la transporter sur le lieu où elle est distribuée.

La distribution de l'eau potable. Elle débute à l'aval d'un point de stockage (château d'eau par exemple) ou d'un point de livraison matérialisé par un compteur d'eau ou d'un point de traitement situé après le point de production. Elle comprend les réseaux publics et les canalisations intérieures des bâtiments, jusqu'au robinet de l'abonné.

I.1 APERCU DE LA SITUATION:

L'alimentation en eau potable de la Région est assurée soit :

- par un réseau de distribution de la JIRAMA
- par de bornes fontaines, qui sont des adductions d'eau réalisées par différents projets ou ONG tels que : le SAF/FJKM, le FIKRIFAMA, le CARITAS, le PAAP et le PNUD/FAO

Dans la région d'Analamanga, les districts proches de la capitale enregistrent un niveau de satisfaction des besoins en eau assez élevé. C'est le cas des districts d'Antananarivo Atsimondrano et Avaradrano, où la consommation en eau potable se répartit comme suit :

Tableau 5: Consommation en eau potable

District	% de la population utilisant		
	Bornes fontaines	Puits	Robinets privés
Antananarivo Avaradrano	2,4	92,6	5
Antananarivo Atsimondrano	50	45	5

Source : DIRA – Antananarivo - 1997

Par contre, l'alimentation en eau est assurée par des puits traditionnels dans les autres districts en exception dans les communes d'Ambohidratrimo, Ambohibao, Talatamaty et Ivato (Eau JIRAMA) et Mahitsy (Bornes fontaines).

Pour les zones rurales, l'eau consommée provient généralement des rivières et des cours d'eau ou des bornes fontaines alimentées par l'eau des sources conduites par système gravitaire installées par des ONG.

I.2 POPULATION ET DEMOGRAPHIE:

I.2.1 Effectifs et Evolution :

Dans l'ensemble de la Région, tous les districts ont plus de 100 000 habitants à l'exception du district d'Ankazobe d'après le recensement général de la population 1993 (RGPH 93). Le nombre moyen de la population dans les districts est de 199 264 habitants.

Tableau 6: Répartition spatiale de la population

Code	District	Population résidente	Pourcentage	Superficie km ²	Densité hab/km ²
101	Antananarivo Renivohitra	710 236	30%	107	6 638
117	Antananarivo Atsimondrano	229 597	10%	379	606
102	Antananarivo Avaradrano	163 471	7%	545	300
115	Andramasina	109 444	5%	1 416	77
107	Anjozorobe	114 312	5%	4 292	27
106	Manjakandriana	159 406	7%	1 718	93
103	Ambohidratrimo	185 146	8%	1 418	131
104	Ankazobe	87 315	4%	7 574	12
Total Analamanga		1758927	76%	17449	101

Source RGPH 93

La population est fortement concentrée à Antananarivo Renivohitra (30%). Cette pression démographique dans la capitale de Madagascar résulte du phénomène d'urbanisation qui attire la population des autres sous préfectures. Les districts d'Ankazobe, Andramasina, et Anjozorobe comptent le moins d'habitants (moins de 6%). Ces zones se caractérisent par l'enclavement de certaines communes et l'insécurité dans le milieu rural.

La densité globale de la population dans la Région est de l'ordre de 101habitants au km², soit presque quatre fois supérieure à la moyenne nationale (22 habitants au km²) selon le RGPH93. Les densités présentent une grande disparité au niveau des districts. En effet, on

peut noter une inégale répartition spatiale de la population entre les milieux urbain et rural et entre les limites administratives.

Ainsi, on distingue des étendues faiblement peuplées dans les districts d'Ankazobe (12 habitants au km²) et d'Anjozorobe (27 habitants au km²) à côté des zones surpeuplées dans les districts d'Antananarivo Renivohitra (6638 habitants au km²), et à moindre mesure, d'Antananarivo Atsimondrano et Avaradrano, respectivement 606 et 300 habitants au km².

De 1975 à 1993, le nombre de population de la Région a fortement augmenté, passant de 1099042 à 1758927. Cependant, une comparaison du nombre de la population entre 1975 et 1993 par sous-préfecture ne peut pas se faire convenablement. En effet, la délimitation géographique ainsi que les structures administratives n'ont pas été les mêmes. En 1993 (intégration de nouvelles divisions administratives, surtout dans le milieu rural), les districts d'Antananarivo Atsimondrano et Avaradrano ne faisaient qu'un seul, celui d'Antananarivo Banlieue.

Tableau 6: Répartition spatiale de la population

District	RGPH 1975	RGPH 1993	1997	2001	2006	2021
Antananarivo Renivohitra	451 808	710 236	801 196	903 450	1040753	1591032
AntananarivoAtsimondrano	120 162	229 597	259 002	499 999	575987	880529
AntananarivoAvaradrano	110 918	163 471	184 407			
Andramasina	71 481	109 444	123 461	139 217	160375	245170
Anjozorobe	62 910	114 312	128 952	145 410	167509	256075
Manjakandriana	121 066	159 406	179 821	202 771	333587	357092
Ambohidratrimo	113 990	185 146	208 858	285 514	328902	502808
Ankazobe	46 707	87 315	98 497	111 068	127948	195598
Total de la région	1099042	1758927	1984194	2287429	2635065	4028306

Source : RGPH 1993 et DDSS-INSTAT-1999

La densité de la population a fortement augmenté de 1993 à 2001 notamment dans la Commune urbaine d'Antananarivo où elle passe de 6638 à 8443 habitants par km².

La formule d'interpolation s'écrit :

$$N = N_0 (1+Y)^n$$

Où N : nombre de population à venir (de projection)

N₀ : nombre de population de l'année de base (2001)

Y : taux d'accroissement annuel de la population

n : nombre d'années comptées à partir de l'année de base considérée

I.2.2 Taux d'accroissement naturel

La population de la Région connaît un taux d'accroissement naturel moyen de 28,7‰. Le taux le plus faible est enregistré dans les sous- préfetures de Manjakandriana (20,9‰) et d'Antananarivo Renivohitra (21,9‰) et le taux le plus élevé revient à la sous- préfecture d'Anjozorobe (33,8‰).

Tableau 8: Taux d'accroissement naturel

Districts	Taux de natalité‰	Taux de mortalité ‰	Taux d'accroissement naturel ‰
Antananarivo Renivohitra	26,3	4,4	21,9
Antananarivo Atsimondrano	34,4	4,7	29,8
Antananarivo Avaradrano	32,7	5,2	27,4
Andramasina	38,2	5,2	32,9
Anjozorobe	42,6	7,8	34,8
Manjakandriana	33,8	6,6	27,2
Ambohidratrimo	34,2	5,4	28,8
Ankazobe	44,0	7,0	37,0
Ensemble de la région	34,1	5,4	28,7

Source : RGPH 93

Soulignons également que l'effectif de la population est plus important en milieu rural qu'en milieu urbain. Environ 65 % de la population de la Région résident en milieu rural. Le reste (35 %) se répartissent inégalement dans les chefs-lieux des districts et les chefs-lieux de communes. 77 % de la population habitent dans les grands centres urbains (65,5 % à Antananarivo Renivohitra).

Antananarivo Renivohitra en tant que Capitale de Madagascar est un centre administratif et abrite des activités industrielles et commerciales importantes ce qui explique le taux d'urbanisation élevé et l'importance du nombre de la population au niveau de la Région (30%).

La population urbaine comprend la population des arrondissements de la Commune urbaine d'Antananarivo et des chefs-lieux des communes urbaines.

Valeur de l'estimation (2006) :

Le calcul statistique de l'évolution quantitative de la population se fait par la formule :

$$N = N_0 (1+Y)^n$$

Donc :

Population totale (Pt) : 2.883.367 hbts

Population urbaine (Pu) : 1.009.178 hbts (soit environ 35% de la Pt) dont 60% desservie de l'AEP

Population rurale (Pr) : 1.874.188 hbts (soit environ 65% de la Pt) dont moins de 10% desservie en AEP.

Consommation d'eau à raison de 90 l/j/hbt : 259.503.030 l/j soit 259.503 m³/j ou 94.718.605.950 l/an soit 94.718.606 m³/an alors que JIRAMA a une capacité de production de 299.420 m³/j dans tout Madagascar.

La population projetée (à 2021) est estimée à 4.407.892 hbts. Dont les besoins s'évalueraient à 396710280 l/j soit 144.799.252.200 l/an ou **144.799.252 m³/an**

Ainsi : face à de tels besoins qui ne cessent de grimper de jour en jour, il est temps de privilégier ce secteur et de réduire ces demandes pour pouvoir penser à d'autres besoins.

II. BESOINS AGRICOLES

L'Agriculture, comme dans tout Madagascar, constitue l'activité principale de l'ensemble de la Région. En effet, les conditions agro-climatiques et humaines permettent une vaste gamme de cultures.

II.1 VALEUR DE L'ESTIMATION

Tableau 9: estimation en agriculture

Cultures vivrières	Riz	Manioc	Maïs	Patate	Haricot	Pomme de terre
<i>Surface en ha</i>	77395	21 140	14815	10355	14 815	21 910
<i>Besoin en eau m³/ha</i>	70	42	57	54	37	49
Quantité d'eau m³/j	5417650	887880	844455	559170	548155	1073590

Source des données (surface) : Annuaire Statistique Agricole 2001

Source des données (besoins) : FAO (cas général)

Besoins pour ces secteurs agricoles (Qa) = 9.330.900 m³/j soit environ 1.702.889.250 m³/an

Ainsi s'ajoute : **204.750 m³/j du GPI** et : **716.030 m³/j du PPI** soit **Qa₁ = 920780 m³/j** ou

168.042.350 m³/an

La consommation totale de ce secteur : Qa + Qa₁ = 10251680 m³/j ou 1.870.931.600 m³/an.

En définitif : on suggère de considérer d'autres cultures apportant les mêmes quantités d'énergie, ayant les mêmes qualités nutritionnelles mais consommant beaucoup moins d'eau.

II.2 CARACTERISTIQUES GLOBALES

La morphologie générale de la Région laisse peu de place à de grandes plaines. Mises à part les régions volcaniques ainsi que les grandes plaines d'Antananarivo, les sols ont dans l'ensemble une fertilité faible.

Deux sous-espaces de production peuvent être distingués :

- les sols de la zone centrale (périphérie du Grand Antananarivo et Antananarivo) réservés à la riziculture irriguée qui occupe la quasi-totalité des espaces disponibles.
- Les sols dans les zones volcaniques offrent les conditions agro-climatiques propices à une gamme variée de cultures

II.3 SUPERFICIE AGRICOLE

Dans l'ensemble, la superficie cultivable ne représente que le tiers de la superficie de la Région. La potentialité agricole est limitée d'une part par le lessivage du sol ferrallitique et d'autre part par le relief très accidenté. Par ailleurs, le développement de la ville diminue la superficie cultivable.

La Région présente par contre une grande marge de développement car un peu plus du tiers de la superficie cultivable est exploitée en 2001.

Tableau 10: Superficie agricole et surface exploitée en 2001

District	Superficie (Ha)	Superficie cultivables (Ha)	Pourcentage / Superficie	Superficies cultivées	Pourcentage /Superficies cultivées
Antananarivo Renivohitra	10 700				
Antananarivo Atsimondrano	92 400	27 995	30%	33 399	119%
Antananarivo Avaradrano					
Andramasina	141 600	18 163	13%	14 436	79%
Anjozorobe	429 200	74 428	17%	20 114	27%
Manjakandriana	171 800	21 500	13%	33 014	154%
Ambohidratrimo	141 800	23 087	16%	29 636	128%
Ankazobe	757 400	283 368	37%	16 184	6%
Total Analamanga	1744900	448541	28%	146783	31%

Source : Annuaire statistique agricole 2001

Dans les districts d'Antananarivo Avaradrano et Atsimondrano, de Manjakandriana et d'Ambohidratrimo, la superficie cultivée est supérieure à la superficie cultivable. Cette situation est due essentiellement à l'importance des cultures de contre-saison pratiquées dans ces zones.

Le district d'Ankazobe est le moins exploité sur le plan agricole. Anjozorobe est aussi sous exploité compte tenu de la superficie cultivable.

Les surfaces cultivées sont occupées à 98,2% par des cultures vivrières. Les cultures de rente représentées par le café restent encore très infimes dans la Région (0,25%) malgré la possibilité de développement de cette spéculation.

Tableau 11: Répartition des superficies cultivées par type de culture (Campagne agricole 2001)

District	Superficies cultivées (Ha)	Cultures vivrières (Ha)	Cultures de rente (Ha)	Cultures industrielles (Ha)
AntananarivoRenivohitra				
AntananarivoAtsimondrano	33 399	32 549	30	820
AntananarivoAvaradrano				
Andramasina	14 436	13871	150	415
Anjozorobe	20 114	19984	15	115
Manjakandriana	33 014	32384	140	490
Ambohidratrimo	29 636	29 571	0	65
Ankazobe	16 184	15 919	20	245
Total Analamanga	146783	144278	355	2150
Pourcentage	100%	98,3%	0,24%	1,46%

Source : Annuaire statistique agricole 2001

En général le calendrier agricole est presque étendu sur toute l'année avec un rythme plus accéléré pendant la saison pluvieuse. Ce calendrier est conditionné par le rythme pluviométrique et les types de culture. Les périodes de pointe se situent comme suit :

- préparation du sol : les travaux s'étalant du mois de Septembre à Novembre
- récolte : la plupart des produits sont récoltés entre le mois d'Avril et le mois de Juin

Pour les cultures de contre saison la période de production s'étale du mois d'Avril au mois d'Octobre :

- préparation du sol : Avril - Mai
- récolte : Septembre – Octobre

II.3.1 Production

II.3.2 Cultures vivrières

Dans l'ensemble de la Région, les cultures vivrières occupent plus de 95 % des superficies cultivées. Les principales cultures sont le riz, le manioc, le maïs, la patate douce, le haricot et la pomme de terre.

Tableau 12: Répartition des superficies par Spéculation en 2001

District	Surf.tot vivrières	Riz	Manioc	Maïs	Patate	Haricot	Pomme de terre	Autres
AntananarivoRenivohitra	0							
AntananarivoAtsimondra- no	32 549	20490	3 480	2 040	730	2 040	3565	204
AntananarivoAvaradrano								
Andramasina	13 871	5 160	3 260	575	805	575	3430	66
Anjozorobe	19 984	9 740	3 720	1110	235	1110	3670	399
Manjakandriana	32 384	12185	6 380	2 495	2 240	2 495	6420	169
Ambohidratrimo	29 571	9 270	1 340	6830	3 730	6830	1540	31
Ankazobe	15 919	10100	870	565	2 270	565	1155	394
Total Analamanga	144278	66945	19050	13615	10010	13615	19780	1263

Source : *Annuaire Statistique 2001*

Bien que la riziculture occupe plus de 42 % de la superficie totale vivrière, elle ne constitue pas une monoculture dans la Région. Les cultures vivrières sont assez diversifiées. Dans certaines sous-préfectures (cas de Soavinandriana) la culture du maïs et de haricot occupe plus de 50 % de la superficie totale cultivée.

II.4 AMENAGEMENTS HYDROAGRICOLES

Depuis 1960, l'augmentation de la production agricole, notamment rizicole, a été considérée comme un des facteurs susceptibles de contribuer au développement économique de la région d'Antananarivo, vu sa haute potentialité agricole. A cet effet, de nombreux projets de développement ont été mis en place dans le domaine de la production rizicole. Tel est le cas des projets GPI, PPI et Microhydraulique qui cadrent surtout leurs actions dans le domaine de l'aménagement hydroagricole visant à améliorer la maîtrise de l'eau à la parcelle.

II.4.1 Grands périmètres Irrigués (GPI)

L'aménagement des GPI concerne les grandes plaines à vocation rizicole. L'objectif est de mettre en valeur de manière rationnelle la potentialité agricole de ces plaines par la mise en place d'une infrastructure hydroagricole fonctionnelle et efficace.

Dans le cas de la Région d'Antananarivo, le seul GPI recensé jusqu'à maintenant est celui de la plaine d'Antananarivo.

Le tableau suivant présente les caractéristiques de cette plaine.

Tableau 13 Grands périmètres irrigués

Type	NOM	Surface irriguée (ha)	Nombre usagers	District
GPI	Plaine de Tana	2.925	7.924	Tana Ville

Source : Annuaire statistique agricole 2001

Avec ses 2.925 ha, le GPI de la plaine d'Antananarivo ne concerne que les 25 à 30% de la superficie totale aménageable de cette plaine. A cause de la montée du fleuve de l'Ikopa, principale source d'eau d'irrigation, en période de crue, certaines zones sont inondées et restent sous l'eau pendant une période plus ou moins longue tandis qu'elles deviennent sèches et impropres aux cultures en période d'étiage.

En résumé, la plaine d'Antananarivo offre encore une grande possibilité d'extension de la superficie dominée moyennant une bonne régulation du débit véhiculé par le fleuve Ikopa.

II.4.2 Petits Périmètres Irrigués (PPI)

A la suite des difficultés rencontrées au niveau de l'entretien et de la gestion des GPI, la tendance générale du sous secteur irrigué fut orientée vers la mise en place d'une structure qui responsabilise mieux les usagers de l'eau dans le domaine de la gestion et de l'entretien des réseaux. Ce fut ainsi la création des PPI.

Tableau 14: Liste des PPI

Région	Nom	Surface. Irriguée	nombre Usagers	District
A N A L A M A N G A	Andakana (1)	230	380	Ambohidratrimo
	Mangamila (1)	175	270	Anjozorobe
	Ankazobe (1)	250	151	Ankazobe
	Alasora (2)	1100		Tana Nord
	Ampahitrosy (2)	650		Tana Sud
	Andalatsoavaly (2)	400		Ambatolampy
	Antsampandrano (2)	380		Ambatolampy
	Ambohimandry (2)	430		Arivonimamo
	Ankazobe (2)	109		Ankazobe
	Ihazolava (2)	530		Ambatolampy
	Fidasiana (3)	200		Tana Nord
	Moriandro (3)	700	900	Ambohidratrimo
	Mahavazina (3)	300		Tana Sud
	Tangaina (3)	350		Tana Sud
	Ambohimangidy	150		Tana Sud
	Soalandy (4)	600		Tana Sud
	Antanatanana	700		Ambohidratrimo
	Andakana (4)	1200		Anjozorobe
	Fenoarivo (4)	500		Tana Sud

(1) anciens PPI (3) Dégâts cycloniques (2) nouveaux PPI (4) Autres périmètres

Source : Annuaire statistique agricole 2001

A la lumière de ce tableau, on peut tirer les remarques suivantes concernant les activités PPI dans la région d'Antananarivo.

Au niveau de l'importance des superficies irriguées, la tendance est de couvrir 10 000ha de superficie irriguée en créant de nouveaux PPI selon la nouvelle approche PPI en partant d'environ 600ha répartis dans les quatre régions,

Soulignons que, dans le cadre de la mise en oeuvre de la phase II du projet PPI, les efforts sont surtout orientés vers la région d'Analamanga avec une création d'environ 5 000 ha de nouveaux PPI.

II.4.3 Projet micro-hydraulique

Le Projet micro-hydraulique fut créé dans le but de pouvoir répondre au besoin croissant des paysans, en matière d'aménagement hydroagricole. Le projet Micro-hydraulique intervient dans les périmètres dont la taille est inférieure à 200 hectares (entre 50 et 200ha). Ses principales zones d'action sont : Arivonimamo, Miarinarivo, pour la région de l'Itasy et pour l'Analamanga, le projet couvre la totalité des districts.

III. BESOINS EN ELEVAGE

III.1 CARACTERISTIQUES GLOBALES

De par son climat et sa position charnière entre les autres Régions, la Région d'Antananarivo est, à tout point de vue, favorable à l'élevage. Pour mieux situer le contexte, les statistiques sur l'évolution des effectifs du cheptel au niveau national et provincial sont données ci-dessus en se référant à l'annuaire statistiques agricoles 2001 du Ministère chargé de l'agriculture et de l'élevage.

Tableau 15: Evolution du nombre de cheptel au niveau national

<i>Espèces</i>	1 998	1 999	2000	2001
<i>Bovin</i>	6753772	7316507	7331908	7646227
<i>Porcin</i>	870 993	659 558	519 223	461 905
<i>Ovin</i>	664 425	523 902	583 950	633 207
<i>Caprin</i>	989 992	995 540	1 033 267	1 179 752
<i>Volailles</i>	21 475 801	22 821 298	21 539 933	24 051 000

Source : Annuaire statistiques agricoles 2001

Au niveau de la province, l'évolution du nombre de cheptel apparaît comme suit :

Tableau 16: Evolution du nombre de cheptel dans la province d'Antananarivo

<i>Espèces</i>	1 998	1 999	2000	2001
<i>Bovin</i>	700 073	820 639	916 363	1 007 918
<i>Porcin</i>	303 110	89 279	80 176	89 802
<i>Ovin</i>	177 190	10 151	7 616	7 913
<i>Caprin</i>	633	326	408	743
<i>Volailles</i>	2 632 643	3 630 500	4 136 783	5 020 000

Source : *Annuaire statistiques agricoles 2001*

III.2 VALEUR DE L'ESTIMATION

Tableau 17 : estimation en élevage

<i>Espèces</i>	<i>Bovin</i>	<i>Porcin</i>	<i>Ovin</i>	<i>Caprin</i>	<i>Volailles</i>
nombres	1 007 918	89 802	7 913	743	5 020 000
Besoins /tête/j (m³)	0,06	0,05	0,04	0,04	0,01
Quantité d'eau /j(m³)	60475	4490	316	29	50200

Source : *enquête auprès des professionnels du domaine Octobre-Novembre 2006*

Les besoins s'élèvent à 115.510m³/j soit environ 42.161.150m³/an

Bref : une baisse de la consommation est aussi nécessaire même si la consommation semble tolérable.

IV. BESOINS EN INDUSTRIE

IV.1 VALEUR DE L'ESTIMATION

Elles sont estimées à 118.300m³/j soit 43.179.500 m³/an

Reparties dans les entreprises industrielles et tertiaires

Source : *Instat 2000*

Tableau 18 : récapitulation des besoins

BESOINS (m³/an)	AEP	AGRICULTURE	ELEVAGE	INDUSTRIE
CONSOMMATION	116.996.260	1.870.931.600	42.161.150	43.179.500
TOTALE (m³/an)	2073268510			

En un mot, il va falloir 2073268510m³ d'eau par an pour subvenir aux besoins de la plaine d'Antananarivo. Alors que selon les estimations, ces besoins seraient triplés d'ici 2021 (sauf pour l'AEP) au minimum si on ne réagit pas.

PARTIE III : EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU

Les choix techniques et économiques concernant l'alimentation en eau de la zone d'étude dépendent, entre autres, des ressources locales en eau de surface et souterraines.

Il est important donc dans le but de ce travail, de recenser les diverses ressources disponibles en précisant bien évidemment :

- la localisation
- leurs caractéristiques
- la quantité disponible pour chaque ressource
- les qualités chimiques et bactériologiques de ces eaux

Afin de ne pas alourdir l'exposé, nous citons dans les annexes certains développements techniques concernant ces investigations ainsi qu'une partie de cours.

I. RESSOURCES EN EAUX DE SURFACE

Les ressources en eaux de surface comprennent d'une part les eaux des cinq grands cours d'eau (Ikopa, Sisaony, Andromba, Katsaoka et Mamba) qui convergent à moins de 20km au Nord-Ouest d'Antananarivo et sur certains points de leur parcours ; toutes ces rivières passent beaucoup plus près de l'agglomération et d'autre part, l'eau des grandes lacs ; lac Mantasoa, lac Tsiazompaniry (tous deux artificiels), lac Mandroseza,...

Le lac Mantasoa se situe, à vol d'oiseau, à 30km d'Antananarivo (ville) et celui de Tsiazompaniry à 45km. (Se reporter à la carte hydrographique)

I.1 CARACTERISTIQUES DES EAUX DE SURFACE

Les eaux de surface, sauf celles de l'Ikopa (et à moindre mesure de la Sisaony), sont toutes polluées, (voir partie résultats).

Leur minéralisation, toujours très faible, dépend de la nature géologique des terrains du bassin versant ; les rivières de l'Est (Ikopa) ont des eaux un peu plus douces que les rivières de l'Ouest (Katsaoka, Andromba).

I.2 DEBITS D'ETIAGES DES COURS D'EAU

I.2.1 Ikopa

Le bassin versant de l'Ikopa au droit d'Antananarivo couvre une superficie de près de 1500km², soit environ le un tiers de la zone intéressée ; en outre ce bassin se développe essentiellement sur le rebord du plateau qui est une zone de forte précipitation.

L'Ikopa est aussi la plus importante des cinq rivières qui drainent la région. D'autre part, les deux rivières dont la réunion forme l'Ikopa, la Varahina-Nord et la Varahina-Sud, ont été régularisées par des barrages. On connaît probablement le débit d'étiage naturel de l'Ikopa, (il devrait être faible, de l'ordre du m^3/s) mais grâce à l'effet régulateur des barrages, les débits d'étiages actuels s'établissent le plus généralement au voisinage de $20m^3/s$.

L'utilisation rationnelle des réserves doit permettre de garantir en tout temps à l'entrée de cette rivière dans la plaine d'Antananarivo.

I.2.2 Autres rivières du bassin

Les autres bassins principaux sont ceux de la Sisaony ($825km^2$), de l'Andromba ($600km^2$) et la Mamba ($300km^2$).

Les débits d'étiage sont inférieurs à $0,5m^3/s$ pour toutes ces rivières. Leur débit décroît dans leur cours moyen et inférieur par suite des saignées effectuées par les canaux d'irrigation et également par suite d'une recharge de la nappe d'Antananarivo.

Quoiqu'il en soit, aucun de ce cours d'eau ne présente, dans son cours inférieur, des conditions permettant son utilisation pour l'alimentation d'une ville importante. Sauf, peut être après régularisation des débits comportant la construction de grandes barrages.

<i>Rivières</i>	Superficie en km^2	Débits d'étiages en m^3/s
<i>Ikopa</i>	1500	20
<i>Sisaony</i>	825	0,1
<i>Andromba</i>	600	0,4
<i>Mamba</i>	300	0,0

Tableau 19: Débit d'étiages des principaux rivières du bassin

I.2.3 Les principaux lacs

En dehors des eaux courantes, l'autre grande ressource potentielle d'eau de surface est constituée par les lacs de barrage.

Le lac de Mantasoà a une capacité de *122 millions de m^3* .

Le lac de Tsiazompaniry a une capacité de *230 millions de m^3* .

Ces lacs, surtout Tsiazompaniry situé dans des zones très peu habitées, ne risquent aucune pollution. Leurs très grandes surfaces par rapport aux bassins de réception, ainsi que leur forme très digitée, assurent très probablement une bonne décantation des eaux et une régularité appréciable de la qualité de l'eau au cours de l'année.

L'obstacle pour l'utilisation de ces eaux est essentiellement la distance, surtout Tsiazompaniry.

Quant à Mantasoa, il est utilisé pour la production d'énergie électrique, l'eau étant turbinée dans la vallée du Mangoro, serait très difficilement conciliable avec un prélèvement annuel de plusieurs dizaines de millions de m³ d'eau.

En fin ces eaux présentent une minéralisation très faible.

Remarque : d'autres lacs peuvent être exploités localement ; ce sont les cas du lac d'Ambohitratrimo, d'Ambohibao, d'Ivato

II. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

La plaine d'Antananarivo présente trois types de nappe:

- dans les alluvions
- dans les latérites et
- dans les roches volcaniques.

Pour faire l'évaluation, on s'appuie sur des résultats des études antérieures comme les travaux géophysiques réalisés auparavant ; à savoir : *forages, piézomètres, essais de débits*.

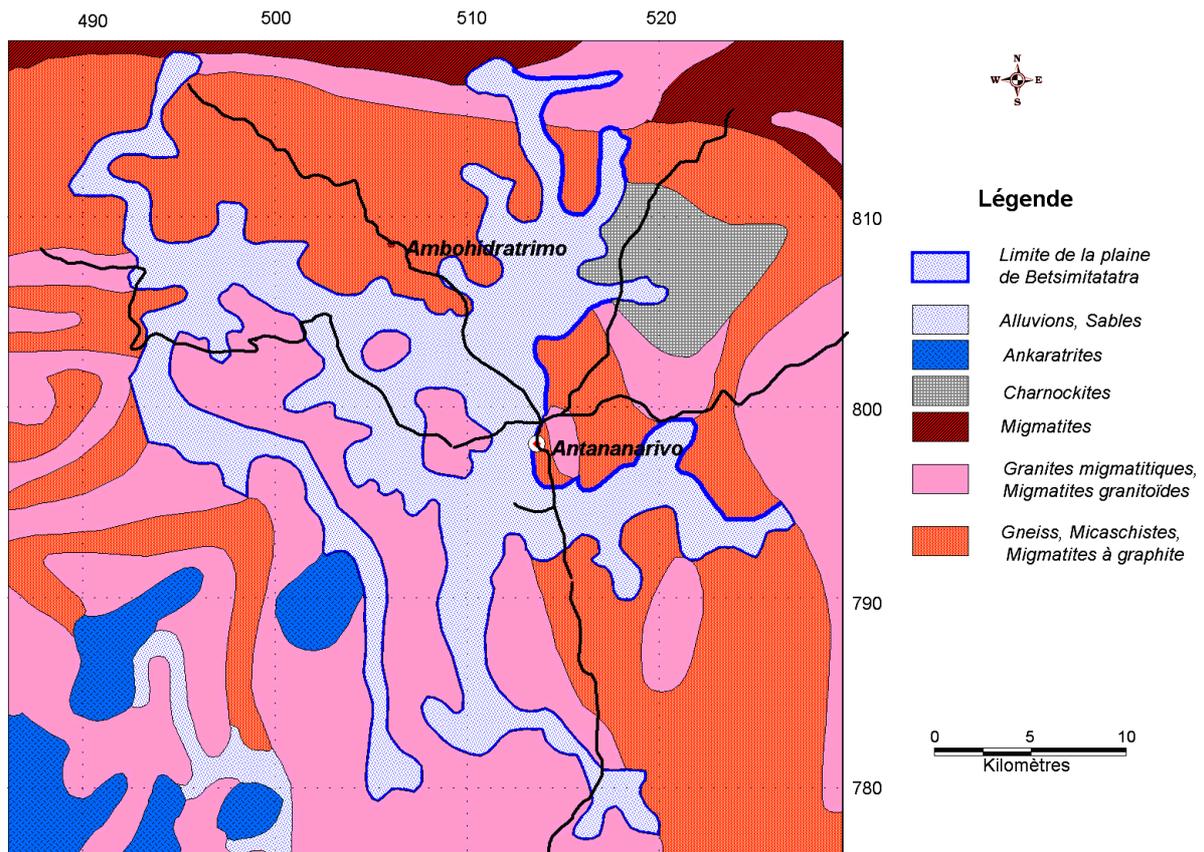
Ces travaux de sondage, forage, et essais de débits ont été exécutés par les équipes de la division hydrogéologie et de la division forage de la Direction des Mines et de l'Energie.

Au total 9 forages, 20 piézomètres et 13 essais de débit ont été réalisés pour une période d'environ 2 mois.

II.1 LES NAPPES DANS LES ALLUVIONS

L'étude des ressources des nappes alluviales se limite à l'étude de la nappe de BETSIMITATATRA. Toutes les ressources souterraines du bassin sont intéressantes, mais la nature géologique de ce bassin fait que seules les zones alluviales peuvent recéler des nappes éventuellement exploitables pour l'alimentation d'une grande ville. Or, il n'existe dans tout le bassin hydrographique qu'une seule plaine alluviale de grande importance, celle de la BETSIMITATATRA qui s'étend sur une superficie d'environ 200km².

La Betsimitatatra résulte de mouvements orogéniques locaux, qui ont permis l'accumulation des alluvions sur une épaisseur atteignant 25m. Elle est bien la meilleure sinon la seule zone permettant l'exploitation d'une nappe souterraine.



Source: SIGM- Service de la Géologie-Ampandrianomby

Figure 5: Localisation de la nappe de Betsimitatatra

II.1.1 Le réservoir alluvial

II.1.1.1 Définition

Le réservoir alluvial est l'aquifère constitué par les alluvions. Il ne comporte donc pas les produits d'altération du socle ni le socle lui-même.

II.1.1.2 Forme et puissance

Le réservoir est constitué par les alluvions de l'Ikopa, de la Sisaony et de la Mamba. Les contours sont digités, analogues à ceux d'un lac de retenue. Le toit est plat, le gradient de pente moyen en direction du Nord est de l'ordre de 0,04%.

Le mur du réservoir est situé par rapport au terrain :

- entre 20 et 25m dans la plus grande partie de la plaine jusqu'à la latitude Nord d'Ambohimanarina.
- vers 8m au confluent de l'Ikopa et de la Sisaony.
- à 0m aux chutes de Farahantsana.

En bordure des reliefs, il semble que le mur du réservoir remonte peu.

II.1.2 Hydrogéologie de la plaine

Le but est d'évaluer les ressources en eaux souterraines de la plaine, donc de rassembler, de corréler les données acquises avec les renseignements existants, et nous abordons l'étude en adoptant la subdivision suivante :

- Secteur 1 : vallée de l'Ikopa entre Ambohimambola et Tanjombato.
- Secteur 2 : vallée de la Sisaony entre Androhibe et Ampitatafika
- Secteur 3 : vallée de l'Ikopa entre Anosizato et Ambohimanarina (plaine urbaine difficile à protéger contre la pollution urbaine).
- Secteur 4 : vallée de la Sisaony - Ambohitrimanjaka
- Secteur 5 : vallée de l'Ikopa – Ambohijafy
- secteur 6 : vallée de la Mamba dans le périmètre limité par les quartiers suivants : Ambohijanahary au Nord – Antanandrano à l'Est ; Soavimasoandro au Sud – Antaranjana à l'Ouest.

Comme le secteur 3, le secteur 6 ne nous est pas fructueux donc nous allons les omettre. Et les secteurs 4 et 5 vont aller ensemble à cause de leurs caractéristiques voisines (voir: partie résultats).

II.1.2.1 Piézométrie

D'après les mesures mensuelles de niveau piézométrique effectuées, les fluctuations saisonnières de la nappe alluviale ont été les suivantes :

Secteur 1 : (vallée de l'Ikopa au Sud d'Antananarivo)

Etiage de la nappe en Octobre

Hautes eaux de la nappe en Février ou Avril

Secteur 2 : (vallée de la Sisaony au Sud-Ouest d'Antananarivo)

Etiage de la nappe et la Sisaony en Août-Octobre

Hautes eaux de la nappe et de la Sisaony en Février

Secteur 4/5 : (vallée de l'Ikopa et de la Sisaony au Nord Ouest d'Antananarivo)

Etiage de la nappe et de l'Ikopa en Août-Décembre

Hautes eaux de la nappe et de l'Ikopa en Février

En définitif, nous constatons que les étiages et les hautes eaux de la nappe coïncident bien avec les étiages et les hautes eaux des cours d'eau.

Tout ceci confirme bien l'existence de relations hydrodynamiques privilégiées entre nappe et cours d'eau.

II.1.2.2 Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère que nous allons essayer de déterminer sont :

- la transmissivité (T)
- le coefficient d'emménagement (S)
- et la diffusivité (T/S).

Ils permettent de déterminer les mécanismes d'écoulement des nappes. A ces grandeurs, il convient d'ajouter les relations hydrodynamiques entre *nappe et rivière* pour caractériser les propriétés hydrauliques du milieu.

II.1.2.2.1 La transmissivité (T)

Elle caractérise l'aptitude de l'aquifère à céder son eau interstitielle (capacité de transit). Dans les secteurs choisis, elle varie de $0,4 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ à $26 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$.

Les zones les plus transmissives sont les suivantes :

Tableau 20 : Transmissivité

Secteurs	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Intervalle de valeur de T (m^2/s)	$(6 \text{ à } 25) \cdot 10^{-3}$	$(1,6 \text{ à } 4) \cdot 10^{-3}$	$(6 \text{ à } 10) \cdot 10^{-3}$	$(3 \text{ à } 9) \cdot 10^{-3}$

Autres : vallées latérales :

Ampasimbe : $T \approx 0,4 \cdot 10^{-3}$

Mamba : $T \approx 0,6 \text{ à } 0,1 \cdot 10^{-3}$

II.1.2.2.2 Le coefficient d'emménagement(S)

Il caractérise l'aptitude des épontes sus-jacentes à maintenir captive la nappe alluviale ; il représente donc l'imperméabilité relative des argiles, tourbes et limons sous lesquels la nappe est en charge.

Les valeurs trouvées sont comprises entre 1 et $15 \cdot 10^{-4}$ ce qui correspond à une perméabilité de l'éponte beaucoup plus faible que celle de l'aquifère sableux.

II.1.2.2.3 La diffusivité hydraulique

Elle résulte des paramètres précédents et elle caractérise la vitesse avec laquelle la nappe réagit aux variations éventuelles des conditions aux limites (niveau des cours d'eau, débit des forages,...). Avec des valeurs de diffusivité, généralement supérieures à $1 \text{m}^2/\text{s}$, la nappe peut être considérée comme « nerveuse », ainsi la mise en exploitation d'un forage peut influencer très rapidement une zone étendue d'aquifère.

II.1.2.3 Relation hydrodynamique avec les cours d'eau

Une nappe alluviale captive ne peut être alimentée que par les coteaux qui bordent (ou d'éventuels aquifères sous-jacents) et par les cours d'eau qui traversent la plaine. Il est donc important de déterminer les possibilités d'échange entre nappe et rivière.

❖ Ce pendant, des considérations géologiques ont montré que :

➤ dans le secteur 1, les épontes superficielles sont constituées par des sables plus ou moins argileux (probabilité de bons contacts entre nappe et Ikopa)

➤ dans le secteur 2, les épontes sont constituées par des limons et tourbes peu perméables mais peu épais

➤ dans le secteur 4/5, les épontes de tourbes et limons sont relativement épaisses

❖ de même, l'étude de Piézométrie de la nappe a montré que :

➤ dans le secteur 1, il existe une forte perte de charge (1 à 2m) au contact de l'Ikopa et de la nappe

➤ dans le secteur 2, la perte de charge au contact nappe-Sisaony ne semble pas importante

➤ dans le secteur 4/5, la perte de charge au contact nappe-Ikopa et nappe-Sisaony est relativement importante.

Tableau 21 : Récapitulation des caractéristiques hydrodynamiques

Secteur	ouvrage	Transmissivité $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	Coefficient d'emmagasinement 10^{-4}	Diffusivité m^2/s	Relation hydraulique avec :	Distance équivalente
1	F3	9	50	1,6	Ikopa	0
	S5	15,4	1,6	97		
2	F2	1,6	4	4	Sisaony	0 à 70m
	F13	3	8	4		
4/5	F6	7,5	-	15	Ikopa	685
	P35	9	-	-		
3	SOMAGE L	6,2	3,4	18	Andriantany	0
	SAV.TROPICAL	2	=100	0,2		
6	F9	0,6	-	-	Mamba	?

II.1.2.4 Mécanisme hydrodynamique

II.1.2.4.1 Alimentation des nappes

On sait que l'alimentation de la nappe alluviale est principalement assurée en saison sèche, par les cours d'eau ; il existe toutefois une alimentation par les coteaux latéritiques.

Durant la saison pluvieuse, il existe un important excédent hydrique 486mm disponible pour l'alimentation de la nappe. Il est peu probable que l'infiltration directe des pluies en direction de la nappe, à travers la couverture de tourbe et d'argile, soit importante et la majeure partie de ces eaux excédentaires doit ruisseler en direction des drains.

II.1.2.4.2 Exhaure de la nappe

Les exhaures de la nappe sont constituées, en partie par les drains et en partie par l'évapotranspiration.

L'efficacité du drainage est évidemment fonction de la perméabilité de la couverture argilo-tourbeuse et de la densité du chevelu des canaux.

En ce qui concerne l'influence de l'ETP sur le comportement de la nappe, on sait que le déficit hydrique du couvert végétal est d'environ 446mm durant la saison sèche.

II.1.2.5 Balance hydrodynamique de la nappe en période d'été

Tableau 22 : Essai de reconstitution de la balance entre apports, transits, et exhaures en période d'été.

Secteur	apport	transit	Evapotranspiration
1	1000 l/s	10 à 20 l/s	450 l/s
2	12 l/s	-	5 à 10 l/s
4/5	8 l/s	15 l/s	-

Malgré les apports des cours d'eau qui peuvent être importants, l'écoulement de la nappe représente en période d'été un débit très faible (10 à 20 l/s) par secteur étudié. Bien que les contacts entre la nappe et le réseau de drainage soient sans doute de mauvaise qualité, la forme de la surface piézométrique est étroitement modelée par le chevelu du réseau.

II.1.3 Ressources potentielles et ressources exploitables

Pour une nappe de ce type dont la balance est toujours automatiquement équilibrée par l'alimentation des cours d'eau, les ressources potentielles sont théoriquement égales au débit disponible dans les cours d'eau.

En ce fait ces deux contraintes peuvent tendre à limiter les possibilités d'exploitation de la nappe par pompage : contrainte physique et contrainte économique.

II.1.3.1 Ressources exploitables par secteur

Le but c'est de chercher dans chaque secteur les ressources mobilisables au moindre coût ;

Pour déterminer les ressources exploitables dans la nappe alluviale, il est nécessaire de connaître (donc de déterminer) pour chaque secteur d'étude, le débit d'exploitation d'un forage, la distance minimale entre forage et le nombre de forages possibles d'être implantés. (Voir annexe)

II.1.3.1.1 Secteur 1

Ressources souterraines facilement mobilisables : 1 700 m³/h (soit 40 000 m³/j) au moyen de 10 forages de diamètre 10" distants de 600m et implantés dans l'axe de la vallée ou 3 puits à drains rayonnants.

Si l'on choisit d'implanter les captages à 100m de l'Ikopa, la productivité des captages diminue de 15% environ mais il est alors possible, en les espaçant de 130m, de produire 160000 m³/j au moyen de 45 captages

II.1.3.1.2 Secteur 2

Ressources souterraines facilement mobilisables : 1.750 m³/h (soit 42.000 m³/j) au moyen de 50 forages de diamètre 10" distants de 100m.

II.1.3.1.3 Secteur 4/5

Ressources souterraines facilement mobilisables : 450 m³/h (soit 11.000 m³/j) au moyen de 5 forages de diamètre 10" distants entre eux de 700m et situés à proximité de l'Ikopa, ou d'un seul puits à drains rayonnants.

II.1.4 Les vallées de la Mamba et de l'Ampasibe

Dans ces vallées peu perméables où l'épaisseur des alluvions susceptibles d'être captées n'excède pas 2 à 5m, les forages conventionnels sont peu performants en raison des pertes de charge toujours élevées au contact de ces formations. Le rabattement disponible étant de 15m environ, le rabattement théorique ne devra pas excéder 5m ; le débit d'un forage de 10 serait ainsi d'environ 5 à 7 m³/h (soit 120 à 150m³/j).

Les caractéristiques de la nappe n'autorisent guère l'exécution de puits à drains rayonnants. Il est donc possible à partir d'un ou plusieurs ouvrages de ce type d'alimenter des villages isolés de 2 ou 3000 habitants (Ambohimangakely par exemple,...)

II.2 LES NAPPES DANS LES LATERITES

II.2.1 Définition

Les latérites sont le produit d'altération, en zone tropicale, de roches cristallophylliennes feldspathiques, plus ou moins riches en éléments ferromagnésiens.

Une coupe verticale effectuée dans ce type de terrain, de la surface au rocher nous donne, la succession de faciès suivant :

horizon supérieur rouge, compact, dont l'épaisseur peut varier de quelques mètres à 20m. C'est cet horizon qui donne la couleur des collines d'Antananarivo.

horizon inférieur clair, friable gardant la structure originelle de la roche mère. L'épaisseur de cette zone peut atteindre, une centaine de mètres sur le haut plateau malgache. Cette épaisseur d'altération est réelle au point de vue pétrographie. Du point de vue hydrogéologique, la zone altérée est celle où les minéraux sont mécaniquement indépendants les uns des autres.

-roches mères, constituées par les roches cristallophylliennes.

L'extension des latérites est très importante dans la région tant en surface qu'en profondeur. Elles recouvrent pratiquement toutes les roches cristallophylliennes.

II.2.2 L'eau dans le complexe latéritique

Le réservoir des latérites est constitué par l'horizon inférieur. L'eau est mise en charge par l'intermédiaire de l'horizon supérieur rouge.

II.2.3 Caractéristiques

- la perméabilité du réservoir est inférieure à $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$;
- la perméabilité de la couverture est inférieure à $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$;
- les débits maxima sont de l'ordre de $40 \text{ m}^3/\text{j}$ par puits et la restitution de l'eau dans l'ouvrage est très lente.
- l'eau a des teneurs en fer voisins de 1 mg/l .

L'eau des latérites doit donc être réservée à l'alimentation en eau de petits villages isolés. L'exploitation de ce type d'eau du complexe latéritique n'est pas envisageable dans le périmètre du grand Antananarivo.

II.3 LES NAPPES DES ROCHES VOLCANIQUES

Ces ressources éventuelles seraient d'exploitation difficile en raison de la grande distance et du relief important qui sépare les grandes planètes basaltiques de la ville d'Antananarivo.

En outre, les rivières qui drainent les ankaratites ont en période d'étiage des débits faibles, de l'ordre de 0,3 à 0,5 m³/s, au maximum. De plus, cette eau est déjà très largement utilisée pour l'irrigation, dans les vallées fertiles qui se trouvent à l'aval des planètes.

Donc selon le but de ce travail, elle ne présente aucun intérêt pratique immédiat.

III. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE DANS LA PLAINE D'ANTANANARIVO

Tableau 23 : bilan hydrique

Mois	N	D	J	F	M	A	M	J	J'	A	S	O	TOTAL
P(mm)	156	287	309	240	204	51	18	9	7	9	12	52	1358
ETP(mm)	168	133	121	95	105	93	81	63	68	90	117	180	1314
P-ETP	-12	154	188	145	99	-42	-63	-54	-61	-81	-105	-128	40
R.F.U	0	100	100	100	100	58	0	0	0	0	0	0	
EXC.Hyd		54	188	145	99								486
Def.Hyd	12						5	54	61	81	105	128	446

P : précipitation moyenne sur 30 ans à Antananarivo ;

ETP : évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite.

RFU : réserve facilement utilisable (≈100mm au maximum).

Ce bilan explique d'une façon numérique les mécanismes des nappes sus-citées.

En bref, pendant la saison pluvieuse il existe une importante quantité d'eau (486mm) disponible pour l'alimentation de la nappe. Tandis que en période d'étiage l'ETP influence le comportement de la nappe, avec une quantité de 446mm de déficit hydrique du couvert végétal.

**PARTIE IV : RESULTATS, INTERPRETATIONS ET SCHEMA
DIRECTEUR D'USAGE DES RESSOURCES EN EAU**

I. EAUX DE SURFACE:

I.1 LES RESSOURCES PRINCIPALES EN EAUX DE SURFACE:

Compte tenu des quantités d'eau nécessaires aux besoins de la région soit environ, 2,07 km³/an en moyenne, les seules ressources en surface susceptibles de garantir une alimentation régulière, sont constituées par les eaux de l'Ikopa.

➤ Le prélèvement direct dans les réservoirs artificiels de Mantasoa et Tsiacompaniry, avec acheminement par aqueduc vers Antananarivo est incompatible avec les contraintes de production d'énergie hydroélectrique en aval des réservoirs.

➤ Les rivières autres que l'Ikopa ne permettent pas de subvenir aux besoins de la région en période d'étiage.

I.2 LES RESSOURCES COMPLEMENTAIRES EN EAUX DE SURFACE:

Si l'on envisage de faire appel aux eaux de rivières que l'Ikopa pour subvenir aux besoins, le point de prélèvement doit être proche du secteur à desservir et la demande doit rester très modique vis-à-vis du débit d'étiage de la rivière concernée.

La Sisaony et la Mamba, avec respectivement des d'étiages moyens de 0,1 et 0,0 m³/s, n'offrent pas de sécurité pour une alimentation régulière. Seule l'Andromba, avec un débit d'étiage moyen de 0,4 m³/s offre quelque garantie pour une exploitation qui n'excéderait pas une centaine de litre par seconde.

En fin quelques petits lacs artificiels tels que ceux d'Ambohitrarimo, d'Ambohibao et d'Ivato peuvent présenter un certain intérêt pour une desserte locale n'excédant pas quelques dizaines de m³/j, malgré les risques de pollution et les contraintes imposées par l'utilisation de la majeure partie de ces eaux pour l'irrigation.

I.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX DE SURFACE

I.3.1 Ikopa et Lac Mandroseza

Les caractéristiques de l'Ikopa et du Lac de Mandroseza sont pratiquement identiques ; toute fois le séjour prolongé de l'eau de l'Ikopa refoulée dans le Lac semble favoriser l'oxydation du fer dont la teneur tend à diminuer.

Tableau 24 : Eau brute Lac Mandroseza

	2005											
	04/01	10/02	15/03	19/04	23/05	24/06	21/07	30/08	28/09	24/10	29/11	21/12
Nature	EB											
Caractéristiques												
NTU	29,9	19,5	34,3	9,68	9,73	8,33	9,65	8,76	7,64	6,81	15,5	54,9
M.O(mg/l)	1,7	1,35	1,3	1,2	1,05	0,55	1,2	1,35	1,4	0,5	0,45	1,75
pH	5,98	7,4	6,9	7,03	7,8	7,3	7,5	7,5	7,2	6,8	7,1	6,5
TH °F	1,2	1,5	1,2	1,8	1,2	0,8	0,9	1,1	0,6	0,9	1	1,1
TAC °F	1,3	1,5	1,1	1,3	1,8	1,2	1	1,1	0,8	0,5	0,9	1,2
TA °F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl ⁻ mg/l	5,32	3,55	2,66	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	5,32	3,55	5,32	5,32
SO ₄ ⁻ mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fer mg/l	0,9	0,35	0,25	5	0,5	trace	trace	0,03	0,25	0,04	0,15	0,5
Na ⁺ mg/l	2,3	2,3	1,72	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	0,5	3,45
Min mg/l	25	31	22	27	21	17	17	17	17	14	21	27
Autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Source : usine JIRAMA Mandroseza.

EB : Eau Brute

MO : Matière Organique

NTU : Turbidité

TH : Titre Hydrométrique ; TAC : Titre Alcalimétrique (Alcalinité)

Tableau 25: Eau de l'Ikopa :

date de prélèvement	08/02/05	23/02/05	16/03/05	14/07/05	30/08/05
Echantillon	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
Aspect	Trouble	Trouble	Trouble	Trouble	Trouble
Couleur	Jaunâtre	Jaunâtre	Jaunâtre	Jaunâtre	Jaunâtre
C (μs/cm)	39,7	34,6	30,4	14,6	33,1
Minéralisation (mg/l)	32	32	28	13	31
NTU	39	76,2	55,5	14,2	15,7
pH	6,7	6,8	6,7	7,3	6,04
M.O (mg/l)	1,9	2,0	2,4	1,1	1,5
DCO (mg/l)	14,4	14,4	57,6	52,8	63,4
Mes (mg/l)	21	525	37,5	10	-
Fer (mg/l)	2,2	1,75	2,0	-	-
Autres	0	0	0	0	0
Observation	Odeur : absent	"	"	"	"

Source : usine JIRAMA Mandroseza.

Autres: NH₄, NO₂, NO₃, PO₄ et (0) : absence de ces éléments

I₁ : Ikopa+Papmad (juste en aval barrage flottant)

I₂ : rivière Ikopa juste en aval barrage flottant après 5m de la sortie rejet Papmad.

I₃ : Ikopa Ambohimanambola ;

I₄ : 50m aval de hintsy ;

I₅ : près de 25m aval hote le hintsy;

La température : elle varie de 14 à 27°C.

Faciès mixte : chloruré sodique et bicarbonaté calcique

Les eaux de l'Ikopa et Lac de Mandroseza sont donc actuellement peu polluées et la pollution du Lac par les habitations qui le bordent semble encore tolérable.

I.3.2 Qualité des eaux superficielles pouvant éventuellement servir d'appoint :

Analyse chimique et bactériologique :

Andromba à Fenoarivo,

Lacs : Ambohidratrimo, Ambohibao, Ikopa.

Analyse chimique : caractéristiques chimiques sensiblement identiques à celles de l'Ikopa.

Tableau 26 : Analyse bactériologique

Nature de l'analyse		A	B	C
Nombre total de bactéries sur gélose par 1ml	24h à 37°C	494	2700	1968
	72h à 20°C	2368	8720	3840
Streptocoques Fécaux (SF) par 100ml		912	5440	348
Clostridium Sulfito-Réducteur (CSR) par 100 ml		60	240	20
Escherichia coli par 100 ml à 44°C		2000	20000	1500
Bactéries coliformes à 100 ml		4000	29000	9000
Coliformes identifiés		Entero et citro bactéries	Entero et citro Bactéries klebsiella	Entero Bactéries

Analyses effectuées par IPM

(A) : rivière Andromba (B) : Lac d'Ambohibao (C) : Lac Ambohidratrimo

On constate que :

L'eau de la rivière Andromba est relativement polluée (bactéries coliformes :4000 au lieu de 10, présence de SF et CSR)ce qui nécessite suivant les normes OMS, un traitement poussé.

L'eau des lacs du Nord de la ville est très polluée (bactéries coliformes :29 000 au lieu de 10,...).

II. EAUX SOUTERRAINES

II.1 RESSOURCES DES NAPPES ALLUVIALES

II.1.1 Localisation, ouvrage, quantité et qualité des ressources

II.1.1.1 Localisation

Trois secteurs sont susceptibles de fournir des ressources appréciables d'eau souterraine :

- Secteur 1 : Sud d'Antananarivo
- Secteur 2 : Sud-Ouest d'Antananarivo
- Secteur 4/5 : Nord Ouest d'Antananarivo

II.1.1.2 Ouvrage

Dans chaque secteur on présentera un ouvrage de forage. Bien que les autres ouvrages tel que sondages et piézomètres interviennent, ils restent des outils d'interprétation

II.1.1.2.1 Secteur 1 : Forage F3

Coupe lithologique :

- 0 – 1m terre végétale
- 1 – 3m terre végétale argileuse grise
- 3 – 6m argile tourbeuse
- 6 – 7m sable argileux gris
- 7 – 10m sable moyen à grossier gris, sale, argileux
- 10 – 11m sable gris fin argileux
- 11 – 14m sable moyen gris argileux
- 14 – 15m sable fin légèrement argileux
- 15 – 17m sable moyen gris.

Condition de l'essai :

Pompe immergé KSB ; débit irrégulier 45 m³/h (+ou-10%) ; durée de pompage 30h.

Observation du niveau sur le forage et sur le piézomètre (P29) situé à 53m de F3 (F3 est situé à environ 90m de l'Ikopa)

Interprétation de la descente du niveau dans P29

Variation assez régulière du niveau. Une réalimentation apparaît après 1h de pompage ; interprétée comme une réalimentation de la nappe par l'Ikopa, elle conduit à des résultats cohérents : $T \approx 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; $S \approx 5 \cdot 10^{-3}$; $T/S \approx 1,6 \text{ m}^2/\text{s}$.

Interprétation de la montée du niveau dans P29

Résultats identiques $T \approx 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Variation du niveau dans le forage

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques trouvées, le rabattement dans le forage devrait être 1,3m après 1h de pompage. Il est en fait de 7,3m ; les pertes de charges au forage atteignent donc 80%.

Conclusion :

Bon aquifère ($T \approx 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). Forage satisfaisant malgré de fortes pertes de charges. Bonnes relations entre la nappe et l'Ikopa ; il est probable que les 6m d'argiles sous lesquels la nappe est légèrement en charge ($S \approx 5 \cdot 10^{-3}$) s'amincissent en direction de l'Ikopa.

II.1.1.2.2 Secteur 2 : forage F2

Coupe lithologique :

- 0 – 1m sable jaune moyen à grossier très argileux
- 1 – 2m tourbe
- 2 – 3m sable très argileux gris
- 3 – 4m sable grossier
- 4 – 6m sable fin très argileux
- 6 – 16m sable grossier blanc
- 16 – 17m sable moyen
- 17 – 19m sable de plus en plus fin et argileux.

Condition de l'essai :

Pompe immergée KSB. Débit relativement stable à 41m³/h. durée de pompage 30h.

Observation des niveaux dans le forage et dans le piézomètre (P25) située à 24,2m de F2.

Interprétation de la descente du niveau dans P25 :

Descente régulière du niveau de 9m à 10h. $T=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $S=4,4 \cdot 10^{-4}$; $T/S=3,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Après 10h de pompage réalimentation franche par la Sisaony. La remontée du niveau dans P25 confirme ces résultats : $T \approx 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $S \approx 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Interprétation de la variation du niveau dans le forage :

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques locales déterminées précédemment, le rabattement dans le forage devrait être d'environ 5,5m après 1h de pompage ; le rabattement observé étant en fait de 6,5m, les pertes de charge au forage ne représentent que 15% du rabattement observé.

Conclusion :

Aquifère localement peu transmissif ($T [1,4 ; 18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}]$). Forage excellent (15% de perte de charge). Aquifère en relation directe avec la Sisaony dans cette zone, bien que relativement en charge sous 1 à 2m de tourbe ($S [3 ; 4 \cdot 10^{-4}]$).

II.1.1.2.3 Secteur 3

Deux forages distants de 73m sont exploités alternativement ;

Coupe lithologique :

0 – 4,5m limons + tourbes

4,5 – 8m sable argileux

8 – 11m sable fin

11 – 13m sable argileux

13 – 21,5m argiles

21,5 – 31,5m sable moyen légèrement argileux

32,2m arrêt du forage dans zone d'altération

Condition de l'essai :

Pompe immergée de 80m³/h. débit stable 75m³/h. dure de pompage 5h.

Observation de la descente du niveau sur l'autre forage (situé à 208m de l'Ikopa).

Interprétation de la descente du niveau

Le piézomètre réagit rapidement et la descente du niveau est régulière durant les 20 premières minutes. $T \approx 6,2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$; $S \approx 3,4 \cdot 10^{-4}$; $T/S \approx 18 \text{m}^2/\text{s}$. au-delà de 20mn, une réalimentation intervient, dont l'origine se situe à 180m du forage, soit approximativement dans le lit de l'Ikopa.

Conclusion :

Aquifère transmissif ($T \approx 6,2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$) relativement en charge sous 4m de limons et tourbes ($S \approx 3,4 \cdot 10^{-4}$). Bonnes relations hydrodynamiques entre la nappe et l'Ikopa dans la zone étudiée.

II.1.1.2.4 Secteur 4/5 : Forage F6

Coupe lithologique :

0 – 1m limons fin
1 – 3m tourbe
3 – 4m sable fin argileux
4 - 5m sable fin à moyen propre
5 – 8m sable fin à moyen argileux
8 – 10m sable argileux à passées grossières
10 – 11m tourbe
11 – 13m sable moyen propre
13 – 15m sable moyen à grossier
15 – 17m sable fin argileux
17 – 18m sable fin à moyen propre
18 – 19m sable fin à moyen argileux
19m arrêt du forage sur zone d'altération.

Condition de l'essai :

Pompe immergée KSB. Débit relativement stable à 60m³/h. durée du pompage 30h.

Observation des niveaux dans le forage et dans le piézomètre (P33) situé à 100m environ.

Interprétation de la descente du niveau

Interprétation sur diagramme « log-log » en raison de l'existence d'une réalimentation ; cette réalimentation ne peut être attribuée à l'Ikopa pourtant situé à 15m de F6 ; elle ne peut donc être attribuée qu'à une réalimentation par l'éponte . Soit $T \approx 7,7 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$. $S \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$. $T/S \approx 14 \text{m}^2/\text{s}$

Interprétation de la montée du niveau

Résultats précédents confirmés : $T \approx 7,4 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$. réalimentation tardive et diffuse.

Interprétation des variations

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques locales déterminées précédemment, le rabattement dans le forage devrait être environ 2,5m après 1h de pompage ; étant en fait de 2,8m, ce rabattement ne comprendrait qu'environ 10% de pertes de charges.

Conclusion

Aquifère localement transmissif ($T \approx 7,5 \cdot 10^{-3}$), et relativement en charge sous 3m de tourbe et argile ($S \approx 5 \cdot 10^{-4}$). L'Ikopa qui s'écoule sur cette éponte semi-perméable, réalimente très

faiblement la nappe. Le forage bien exécuté et développé, présente un excellent rendement (10% de perte de charge).

II.1.1.2.5 Secteur 6 : Forage F9

Coupe lithologique :

- 0 – 2m tourbe
- 2 – 3m tourbe et argile
- 3 – 4m argile et sable fin
- 4 – 15m sable très fin et argile
- 15 – 17m argile- tourbe- sable très fin
- 17 – 19m sable très fin et argile
- 19 – 25m sable fin

Condition de l'essai :

Pompe immergée KSB. Débit relativement stable 8,6m³/h. durée de pompage 4h.

Observation de la descente et de la remontée du niveau sur F9 lui-même (le P41 situé à 100m environ n'a pas varié).

La descente du niveau dans le forage inutilisable en raison de l'importance des pertes de charge par rapport au rabattement de la nappe ;

Interprétation de la montée :

Le niveau remonte rapidement durant les 2 premières heures, traduisant la faible T des terrains environnants. La variation du niveau s'ordonne ensuite suivant une perte plus douce traduisant l'existence d'une zone plus perméable mais relativement éloignée : $T \approx 6,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s. la perte de charge au forage est très importante (de l'ordre de 10m pour un rabattement total de l'ordre de 14m).

II.1.2 Quantité des ressources par secteur

Secteur 1 :

40 à 160.000 m³/j suivant le nombre et la localisation des forages (de 10 à 45 forages à 150 m³/h) ;

Secteur 2 :

40.000 m³/j (avec 50 forages à 35 m³/h)

Secteur 4/5 :

11.000 m³/j avec 5 forages à 100 m³/h.

Les vallées de la Mamba et de l'Ampassibé peuvent fournir des ressources d'appoint : suivant le type de captage utilisé, des prélèvements de 100 à 1.000 m³/j peuvent être escomptés.

Au total on peut en disposer d'environ 211.000 m³/j dans les nappes alluvionnaires soit environ 77.015.000 m³/an

II.1.2.1 Qualité physique, chimique et bactériologique de l'eau des nappes alluviales

Tableau 27 : analyse physico-chimique

secteur	T[°C]	NTU	pH	TH[°F]	TAC[°F]	Fer[mg/l]	Mg[mg/l]	Min TOTAL
1	21à 22	parfait	5,7à 6,2	1 à 3	1 à 3	5,8	≤0,05	30 à 70
2	21à 22	parfait	5,7à 6,2	1 à 8	2 à 10	7,9	-	40 à 200
4/5	21à 22	parfait	5,7à 6,2	1 à 7	2 à 11	16	0,09	50 à 150
vallée	21à 22	parfait	5,7à 6,2	4 à 7	9 à 10	7,2	-	150 à 200

Les caractéristiques de l'eau des nappes alluviales sont très variables d'un endroit à l'autre.

Les faciès chimiques sont du type *bicarbonaté calcique à chloruré sodique*.

On enregistre à l'état de traces, d'azote (nitrates, nitrites et ammoniacque) et sulfates.

Tableau 28: analyse bactériologique

Analyse concernant les eaux Suivantes	Nombre total de bactéries sur gélose par 1ml	
	24h à 37°C	72h à 20°C
Forage de SAV.TROPICAL	40	30
Forage SOMAGEL	1	19
Forage AMSTEL	0	1

Coliformes identifiés : NEANT.

Absence de SF, CSR, d'escherichiacoli, de bactéries coliformes.

Conclusion :

Ses eaux sont déclarées bactériologiquement potables (d'après IPM) mais chimiquement impropres à la consommation en raison des teneurs en Fer.

II.2 RESSOURCES EN EAUX DES LATERITES

Les collines latéritiques qui dominent la plaine d'Antananarivo peuvent contenir des petits aquifères ; un puits bien construit atteignant l'horizon altéré peut produire 30 à 43 m³/j.

Ainsi à Alasora (Sud d'Antananarivo), à Ambohimangakely (Est), à Ilafy (Nord-Est) des puits existent qui produisent une eau de bonne qualité chimique.

Tableau 29: caractéristiques chimique

Caractéristiques	pH	TH	TAC	Fer	Minéralisation
<i>Alasora</i>	≈6,4	2 à 3	3 à 4	1 à 2	100
<i>Amb/kely</i>	≈6,4	1 à 4	0,5 à 1,5	0,2	100 à 150
<i>Ilafy</i>	≈6,4	2	1	1	50

Par contre sur le plan bactériologique, pour le cas d'Alasora à titre d'exemple :

Nombre de bactéries sur gélose par 1ml :

24h à 37°C : 44 ;

72h à 20°C : 1496

SF/100ml : 2

CSR/100ml : 10

Escherichia coli/100ml à 44°C : 126

Bactéries coliformes/100ml : 90

Coliformes identifiés : Entero bactéries et citro bactéries

Conclusion :

Sur le plan bactériologique, ces eaux sont relativement polluées. Sont donc déclarées non potables (d'après IPM).

III. SCHEMA DIRECTEUR D'USAGE DES RESSOURCES EN EAU

Tableau 30 : Usage de l'eau

Potentialité de développement	Ressources en eau disponibles m ³ /an	Besoins en eau m ³ /an (actuelles)	10 ans à raison d'augmentation de 4% (m ³ /an)	20 ans après au même condition
AEP	109288300	2073268510	2156199250	4398646470
Agriculture				
Elevage				
Industrie				

Donc on consent bien que ces besoins seront presque doublés d'ici à 20 ans. Pour y subvenir, un appel aux eaux souterraines devient inévitable. Mais, étant donné que la production de cette dernière est limitée (environ 77.745.000 m³/an), il est recommandé d'envisager l'infrastructure des grands barrages dans les autres rivières.

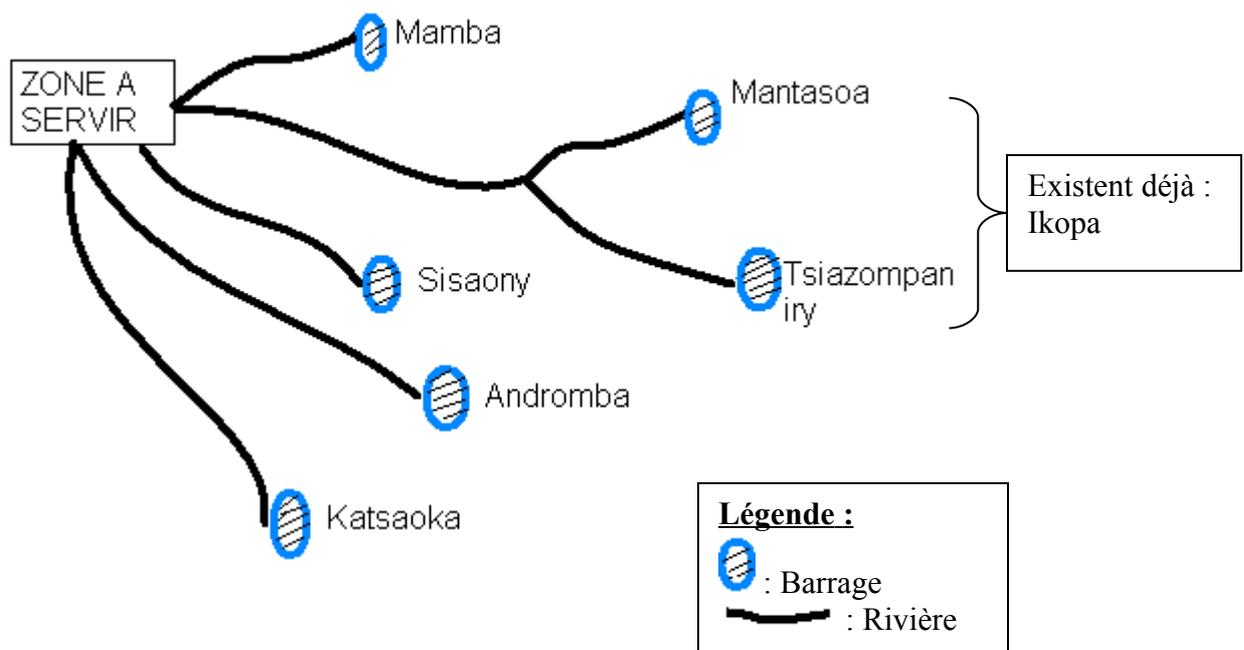


Figure 6 : Représentation des différents barrages possibles

Le but de chaque barrage est de régulariser les eaux en période des hautes eaux afin de fournir des débits d'étiages assez importants, mais aussi pour éviter les inondations.

Soulignons également que pendant les parcours (barrage, zone à servir) ces eaux rencontreront des simples petits barrages (pour usage personnel, collectif, irrigation,...).

CONCLUSION GENERALE

Les ressources en eau exploitables pour l'alimentation de l'agglomération d'Antananarivo sont largement suffisantes même en allant jusqu'à 2021. Les choix d'exploitation semblent donc limités. Des études, en particulier au niveau des plans directeurs permettent d'effectuer un classement des différentes ressources disponibles.

Cependant, certaines constatations s'imposent dès maintenant : les ressources souterraines ne peuvent subvenir aux besoins futurs que dans des conditions limites, en mobilisant l'ensemble des disponibilités. Bien que les quantités disponibles soient limitées, l'exploitation des ressources n'est pas écartée pour autant. Elles pourraient en particulier servir d'appoint dans un système d'approvisionnement faisant appel simultanément aux eaux de surface et aux eaux souterraines.

Les ressources souterraines sont surtout abondantes à l'amont des plaines en particulier à proximité immédiate des installations de production actuelles d'eau filtrée prise à l'Ikopa (Mandroseza).

Le choix entre eaux de surface et eaux souterraines ne repose donc pas sur des critères de localisation. Dans ces conditions, et à prix de revient équivalent, la préférence est généralement donnée aux exploitations des eaux souterraines qui sont normalement les moins polluées.

Dans le cas de la ville Antananarivo, cette situation n'est pas évidente : pendant toute la période des basses eaux, l'eau de l'Ikopa provient pour l'essentiel du grand barrage de Tsiacompaniry dont le bassin versant est pratiquement inhabité. Certes, pendant son parcours, entre la sortie du lac et Antananarivo, cette eau est soumise à diverses pollutions bactériennes ; quelques mesures conservatoires relativement peu coûteuses suffiront à améliorer encore la situation actuelle telle que l'application au sens strict du code de l'eau qui assure la protection de l'avenir.

Sur le plan des pollutions chimiques, la situation ne paraît pas foncièrement différente entre le cours d'eau et la nappe d'eau souterraine. Dans ces deux cas, cette situation ne peut pas être réglée que par la mise en place d'un système de surveillance sur l'emploi des produits chimiques sur les modestes surfaces agricoles du bassin de l'Ikopa ; il faudra aussi dans tous les cas neutraliser les nuisances des pollutions industrielles. Le reboisement du dit bassin, capable par ailleurs de régulariser les débits de crue, apporterait un remarquable complément de protection, en plus, une zone d'aménagement devrait être envisagée aux alentours d'Ikopa.

Sur le plan de la qualité des eaux pour l'alimentation humaine, les eaux souterraines présentent l'avantage d'être plus minéralisées que celles de l'eau de surface ; par contre, les eaux souterraines comportent des teneurs de fer inacceptables et il est peu probable qu'un

lessivage intense de la nappe par les eaux de l'Ikopa soit bénéfique. Il faudra quand même prévoir une déferrisation.

Sans préjuger des comparaisons économiques ultérieures, on est actuellement enclins à préférer, pour une exploitation intensive de la filtration artificielle des eaux de surface à la filtration naturelle des mêmes eaux par la nappe ; cette préférence est principalement motivée par la sécurité de fonctionnement des installations et par les moindres servitudes d'entretien.

Par contre les eaux souterraines pourront être utilisées avec profit, soit comme appoint, soit pour l'alimentation de secteurs excentrés, soit pour des usages industriels.

De ce fait, les propositions suivantes semblent nécessaires pour assurer la disponibilité des ressources à l'avenir:

- améliorer la protection des ressources
- instaurer un comité de suivi et d'évaluation qui se charge de fournir un rapport trimestriel ou semestriel sur la quantité et la qualité de ces ressources
- utiliser des méthodes géophysiques comme (sondages électriques, panneau électrique,...) pour quantifier les eaux souterraines
- réduire la consommation dans tous les secteurs concernés
- envisager une infrastructure de barrage dans la rivière d'Andromba
- mener une campagne de recherche dans les secteurs difficilement accessibles et inconnus;
- assurer le bon fonctionnement des installations en fonction
- mettre en œuvre le principe de la non gratuité de l'eau
- mener une campagne de sensibilisation sur le rôle, la nécessité, l'état actuel et le danger que nous allons faire face en cas de pénurie de l'eau

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Besairie H.**, 1970. Contribution à l'étude des sources minérales et des eaux souterraines de Madagascar.
- BRGM**, 1966. Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères.
- Villars G.**, 1963. Ressources en eau souterraine : classification et méthodes d'évaluation.
- Riquier J.**, : 1960. Le bilan hydrique des sols calculé d'après les données météorologiques courantes.
- Leroux B.**, 1969. Adduction d'eau de Mahitsy exposé des résultats obtenus lors de l'étude des possibilités aquifères des alluvions dans Maniandro aux abords de Mahitsy.
- Leroux B.**, 1968. Ressources en eau de la région de Tananarive essai de synthèse.
- OMS.**, 1973. Approvisionnement en eau et assainissement de Tananarive (Tome I à Tome VI).
- OMS.**, 1962. Rapport sur l'alimentation en eau potable et assainissement de Tananarive.
- ONU-BRGM.**, 1968. Etudes des ressources aquifères souterraines à Madagascar prospection géophysique.
- Chaperon P., Danloux J., Ferry L.**, Fleuves et rivières de Madagascar
- ORSTOM.**, (campagne de 1965 à 1968) Etude hydrologique de la plaine de Tananarive.
- Rafamatanantsoa M. H., Rakotondratsima J.**, 1973. Reconnaissances hydrogéologiques de la plaine de Tananarive aux environs de Tanjombato-Alasora.
- Rakotondranibe. J. H.**, 1983. Les eaux souterraines de Madagascar.
- Rakotondranibe. J. H.**, 1985. Situation de l'AEP à Madagascar.
- Ranivoarisoa O.**, 2005. Exploitation des eaux souterraines dans le district de Mahabo ; mémoire MSTGA.
- Razafindrakoto B.G.**, 2004. Imagerie et modélisation géophysique et hydrochimique du sous sol de la région du Menabe - Application à la recherche hydrogéologique ; thèse de doctorat.
- .Bremond R.**, 1961. Mesure piézométriques et essais de pompage dans les nappes souterraines.
- Réseau hydro-agricole.**, 2000. Etude d'aménagement de la plaine de Tananarive.
- SIF (entreprise).**, 1968. Plaine de Tananarive sondage de pré-reconnaissance hydrogéologique.
- Développement urbain du grand Antananarivo.

WEB BIBLIOGRAPHIQUE :

- http://www.silogic.fr/svhauvergne/meth_piezo.html Août et Septembre 2006
http://www.gov-antananarivo.mg/mono_agri.shtm Septembre 2006
<http://www.madanews.com/IboniaJirama04I/> Octobre 2006
<http://hydram.epfl.ch/e-drologie/> Avril, Juillet, Septembre et Octobre 2006

ANNEXE 1 : Moyens mis en œuvre pour l'exploitation des eaux souterraines

- Forages : appareil failing 1.500 mixte battage/rotation, monté sur camion.
- Piézomètres : deux chèvres, tarières à main.
- Développement des forages : compresseur pour air lift.
- Essais de pompages :
 - * une pompe immergée KSB à 5 étages pour trou de 8" ;
 - * une pompe Bernard à moteur diesel installée en surface (Q : 15m³/h)

Forages 8"

Technique du forage :

- Reconnaissance pour échantillonnage des terrains traversés au rock bit de 5"7/8 sous injection d'eau ;
- Réalésage du trou au rock bit de 15" ;
- Descente d'un casing de soutènement de 9"5/8, avec injection d'eau si les parois tiennent mal, (ce qui fréquemment le cas) ;
- Mise en place au droit de l'horizon à étudier de 6m en moyenne de crépines Johnson 6", slot 20, prolongée jusqu'en surface par tube de 8" ;
- Remontée du casing 9"5/8

Développement.

Le développement est exécuté à l'air lift pendant 48h.

Essais de pompage et échantillonnage.

- Pompage à 50m³/h pendant 30h ;
- Mesures de la remontée pendant 8 à 12h ;
- Essais à 3 ou 4 paliers durant 45 minutes ;
- Prélèvement d'échantillonnage d'eau pour analyse pendant toute la durée des essais ;
- Remontée de la pompe et extraction de l'équipement tabulaire.

Piézomètre :

Technique du forage

- Traversée des limons et tourbes de surface avec tarière à main 8" ;
- Mise en place d'une tube de W 6" et soupape à l'intérieur en faisant suivre le tube ;
- Mise en place au droit de l'horizon à étudier de 4m de crépine Johnson 3", slot 20, prolongée jusqu'à la surface par un tube plein de 4".

Développement :

Il est effectué pendant 6 à 12h, à l'aide d'une pompe Bernard de surface.

Essais de pompage :

- Essai à débit constant pendant 6 à 8h ;
- Mesure de la remontée pendant 7 à 12h ;
- Prélèvement d'échantillon d'eau pour analyse ;

Equipement :

À la fin des essais, la crépine Johnson est remontée. On équipe alors le trou en piézomètre à l'aide d'un tube plein de 2" crépiné au droit de l'horizon étudié. Puis, on extrait la colonne 6". L'ensemble du tube 2" est cimenté. Le piézomètre est repéré par son numéro caractéristique.

Annexe 2 : détermination très approximative des RFM

Rappel :

Théorème de Theiss :

Hypothèses : pompage à débit Q constant
 nappe captive d'épaisseur constante et de grande étendue.

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad u = \frac{x^2 S}{4Tt}$$

$$W(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$\Delta(x, t)$: diminution de charge de pression au temps t et à la distance x de l'axe du puits ;

T : transmissivité de l'aquifère ;

S : coefficient d'emménagement de l'aquifère ;

$W(u)$: fonction caractéristique du puits ou courbe standard.

Formule d'approximation logarithmique (Jacob)

$(u < 0,01)$

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{x^2 S}$$

T et S sont supposées connues. Sur le pourtour du puits $x=r$ et pour une durée déterminée ; on

Secteur 1 :

Hypothèses de calcul :

Les relations hydrodynamiques entre la nappe et l'Ikopa sont bonnes :

- ❖ réalimentation franche de la nappe par l'Ikopa lors des essais sur les forages ;
- ❖ réalimentation non décelable lors de l'essai ;

La transmissivité de l'aquifère est supérieure ou égale à $10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ dans une bande médiane de la plaine, longue de 3,5Km environ et située à 700m en moyenne des piémonts imperméables qui encadrent la plaine.

On suppose que :

- ❖ les caractéristiques hydrodynamique moyennes de la nappe dans cette bande médiane sont les suivantes : $T = 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$; $T/S = 30 \text{m}^2/\text{s}$;
- ❖ l'Ikopa est en relation directe avec la nappe ;
- ❖ le toit de l'aquifère transmissif se situe à 15m du sol ;
- ❖ le niveau statique est à 1,3m du sol en moyenne ;
- ❖ les pertes de charge n'excéderont pas 4m dans les forages (ce qui suppose que les forages seront parfaitement exécutés) ;
- ❖ l'influence mutuelle des forages n'induit pas un rabattement supplémentaire par ouvrage supérieur à 1m.

calcul du débit d'exploitation d'un forage :

Diamètre du forage 10 " ($r_p = 0,125\text{m}$)

Décomposition du rabattement maximum 13,7m :

-hauteur de la pompe et garde du niveau bas : 2,7m ;

-rabattement induit par les forages voisins 1m ;
 -rabattement propre du forage 10m dont 4m de pertes de charge et 6m de rabattement théorique (S_p).

Distance du forage aux écrans imperméables constitués par les collines et situés de par et d'autre la bande médiane : $700m = r_e/2$

$$S_p = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{r'^2}{r_p^2} \left(2,25 \frac{Tt}{Sr_e^2} \right)^2$$

$$\text{Ou } 6m = \frac{0,183Q}{1,2 \cdot 10^{-2}} \log \frac{(2 \cdot 500m)^2 (2,25 \cdot 30 \cdot 86400s)^2}{(0,125)^2 (2 \cdot 700m)^4}$$

Soit **Q = 48 l/s ou 170 m³/h**

Distance minimale entre forage :

Distance minimale entre forage : d

$$S_p = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{d^2 + (2 \cdot 500)^2}{d^2}$$

$$\text{Ou } 0,5m \geq \frac{0,183 \cdot 48 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-2}} \log \left(1 + \frac{(1000)^2}{d^2} \right) \text{ d'où } \mathbf{d \geq 600m}$$

Nombre de forage :

Sur les 6000m de la bande médiane, il doit être possible d'implanter **10 forages** de ce type.

Secteur 2 :

Hypothèses de calcul :

Les relations hydrodynamiques entre la nappe et la Sisaony sont bonnes.

Les conditions aux limites du problème sont les suivantes :

Rivière fictive située à 135m des forages (en rive gauche de la vallée) ;

Limite imperméable située à 1500m des forages (en rive droite de la vallée) ;

❖ le toit de l'aquifère se situe à 10m du sol ;

❖ le niveau statique est à 1m du sol en moyenne ;

Décomposition du rabattement maximum 9m :

-hauteur de la pompe et garde du niveau bas : 2,5m ;

-rabattement induit par les forages voisins 1m ;

- pertes de charge 1m ; et 4,5m de rabattement théorique (S_p).

Calcul du débit d'exploitation d'un forage :

*T moyenne de l'aquifère : $2,5 \cdot 10^{-3} m^2/s$;

*distance à la rivière fictive $r'/2=135m$;

*diamètre du forage 10'' ;

En vertu de la théorie des images, le rabattement s'écrit :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{r'^2}{r_p^2} * C_e \quad \text{avec}$$

$$C_e = \frac{2,25Tt}{r_e^2 S} ; \text{ Coefficient d'influence des coteaux imperméables}$$

$$\text{Soit } 4,5m = \frac{0,183Q}{2,5 * 10^{-3}} \log \left(\frac{135}{0,125} \right)^2 \text{ ou } Q=9,5 \text{ l/s ou } 35 \text{ m}^3/\text{h}$$

Distance minimale entre forage :

Distance minimale entre forage : d

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{d^2 + 135^2}{d^2} \text{ avec } s=0,5m \text{ et } Q=9,5 \text{ l/s on a } d \approx 100m$$

Nombre de forage :

Une **cinquantaine de forage** permettraient de produire 500l/s soit 1.750m³/h ou 42.000m³/j.

Secteur 4/5 :

Hypothèses de calcul :

Les possibilités d'exploitation de la nappe dans le secteur 4/5 sont limitées par la mauvaise qualité des relations hydrodynamiques de la nappe avec l'Ikopa.

Pour effectuer les calculs, on supposera que :

Le toit de l'horizon capté est situé à 9,5m sous le niveau statique d'étiage ;

Les forages sont implantés à 100m de l'Ikopa ;

La distance entre forages est l'influence de chaque forage sur les 2 forages les plus proches correspond à un rabattement induit inférieur à 1m ;

La qualité d'exécution des forages est bonne.

Calcul du débit d'exploitation d'un forage :

Diamètre du forage 10 " ($r_p=0,125m$)

Décomposition du rabattement maximum 9,5m :

-hauteur de la pompe et garde du niveau bas : 2,5m ;

-rabattement induit par les forages voisins 1m ;

- rabattement propre du forage 6m dont 0,6m pertes de charge; et 5,4m de rabattement théorique (S_p).

Distance du forage Ikopa : 100m ;

Distance du forages à la ligne fictive de réalimentation : 785m ;

$$S_p = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{r^2}{r_p^2} \text{ ou } 5,4m = \frac{0,183Q}{7,7 * 10^{-3}} \log \frac{(2 * 785)^2}{(0,125)^2}$$

soit **Q = 27,8 l/s ou 100 m³/h** environ.

Distance minimale entre forage :

Distance minimale entre forage : d

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{d^2 + (2 * 785)^2}{d^2} \text{ ou } 0,5m \geq \frac{0,183 * 27,8 * 10^{-3}}{7,7 * 10^{-3}} \log \left(1 + \frac{1570^2}{d^2} \right)$$

Soit **d ≥ 700m**

Nombre de forages:

Le nombre de forages serait de **4 au maximum** le long de l'Ikopa. Mais comme la transmissivité est bonne on peut donc prévoir un cinquième.

Annexe 3 : Puits à drains rayonnant

Définition :

Cette technique plus coûteuse que la technique conventionnelle consiste à introduire dans l'aquifère une série de drains à partir d'un puits collecteur de grand diamètre ($1,50 < \phi < 4\text{m}$). L'espace annulaire doit être cimenté pour empêcher le mélange des aquifères superficiel et profond. La longueur des drains peut atteindre 100m.

Deux types de procédés peuvent être envisagés :

- le procédé RANNEY et FEHLMANN
- le procédé CLAUSSE.

Procédé RANNEY et FEHLMANN :

A la base du puits collecteur, on enfonce au jet et sous pression un ou plusieurs tubes provisoires. Le trou est ensuite équipé d'une crépine et le tube de travail retiré. Dans la plaine d'Antananarivo, les drains pourront être équipés de crépine Johnson ($\phi : 6''$ ou $8''$). Ce procédé appliqué ici s'avéra coûteux.

Procédé CLAUSSE :

Ce procédé consiste à réaliser autour du puits collecteur une zone dépourvue d'éléments fins pouvant atteindre 20 à 30m de rayon. A la base du puits, on fonce des tubes crépinés horizontaux munis d'une tête de forage. Par injection d'air ou d'eau sous pression on enlève les éléments fins, ce qui provoque un dessablage énergétique. Les tubes crépinés sont alors retirés. La fenêtre de travail est munie d'une grille et sert de barbacane. La zone aquifère située dans un rayon de 20 à 30m autour du puits peut être ainsi traitée.

Cette technique serait probablement mieux adaptée à la plaine d'Antananarivo que le procédé de RANNEY et FEHLMANN.

Avantages du puits à drains rayonnants

Ce type d'ouvrage permet de soutirer des débits 4 à 5 fois supérieurs à ceux que l'on peut attendre d'un forage conventionnel.

Annexe 4 : détermination de ETP

La formule de Thornthwaite donne, en premier lieu, une ETP non corrigée en centimètre, qu'il faut ensuite multiplier par un coefficient de correction λ . Ce coefficient dépend de la latitude et du mois considérés.

$$ETP_{nc} = 1,6 \times \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$ETP_c = \lambda \times ETP_{nc}$$

$$I = \sum_1^{12} i$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239$$

avec ETP_{nc} : ETP non corrigée

ETP_c : ETP corrigée

T : température mensuelle en degré Celsius

I : indice thermique annuelle

i : indice mensuelle

Annexe 5 : Normes de potabilité des eaux Recommandées par l'OMS

Catégories	Caractéristiques	Symbole	Unités	Eaux souterraines
<i>Caractère Physico-chimique Et organoleptique</i>	Température	T°	°C	7-25
	Couleur	Coul	U-Pt	0-20
	Turbidité	NTU	G/m ³	0-20
	Goût, odeur		Seuil	1-4
	pH	pH		5,5-8
	Résistivité	R	Kohm/cm	1-5
<i>Examen Préliminaire</i>	Dureté totale	Th	°F	0-60
	Alcalinité	TAC	°F	0-40
<i>Signe de pollution</i>	Matière organique	MC	mg/l	0-3
<i>Elément toxique</i>	Chlorures	Cl	mg/l	0-500
<i>Cations</i>	Calcium	Ca	mg/l	0-200
<i>Qualité bactériologique</i>	Coliformes totaux		nombre	10/100
	Coliformes fécaux		nombre	Absence dans 100ml

RESUME

L'eau est un besoin mais aussi une nécessité vitale. Sans elle, la vie est pratiquement menacée. Mais la vie de l'être humain est en danger à cause de ses exploits. Face à ces problèmes et du caractère hautement prioritaire du secteur de l'eau et de l'assainissement, il s'avère nécessaire de bien connaître les ressources disponibles que ce soit les ressources d'eaux de surface ou souterraines.

Ce travail consiste à comprendre et à estimer les besoins et les ressources en eau, et de recenser les diverses ressources disponibles dans la région d'Analamanga, à fin de pouvoir mieux gérer la situation. Pour cela, des ouvrages tels que sondages, forages piézomètres et des essais de débits ont été réalisés. Si bien que la région jouisse d'une abondance en eaux, certains districts connaissent un taux de dessert en AEP très faible. Cela suppose que le schéma directeur d'usage ainsi que la gestion de ces ressources sont inégalement appropriés ou exécutés.

Mots clés : région Analamanga, besoin en eau, ressources en eaux, eaux de surface, eaux souterraines, sondage, forage, piézomètres, essais de débits, gestion

SUMMARY

Water is a need but also a vital need. Without it, the life is practically threatened. But the life human being is in danger because of these exploits. Vis-à-vis these problems and highly priority character of the sector of water and cleansing, it proves to be necessary to know the resources available well that they are the resources of water surface or underground. This work consists at include/understand and considering the requirements and the resource water, and to count the various resources available in the area of Analamanga, at end of better being able to manage the situation. For that, works such as surveys, drilling piezometers and the tests of flows were carried out. So that the area enjoys a water abundance, certain districts know a rate f dessert in very weak AEP. That supposes that the directing diagram of use as well as the management of these resources unequally are adapted or carried out.

Key-words: Analamanga area, requirements out of water, water resources, surface water, subsoil water, surveys, drilling piezometers, tests of flows, management

Encadreurs : -RAZAFINDRAKOTO.B.G ;
Mail : boniraz@yahoo.fr
-RAKOTOARIMANANA

Impétrant : DANIEL Ali Bandar
Lot : VT1 Ter AA
Andohaniato Ambohipo
BP : 1258 Analakely Tana(101)
Mail: bandarkaz@yahoo.fr