
SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
LISTE DES ACRONYMES	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES PHOTOS	VII
GLOSSAIRE	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
Partie I : GENERALITES	4
Chapitre I. CONTEXTE GENERAL	5
Chapitre II. PROBLEME DES RESSOURCES EN EAU FACE AUX ALEAS	15
Chapitre III. ZONE D’ETUDE	19
Partie II : MATERIELS ET METHODES	38
I. METHODOLOGIE D’APPROCHES	39
II. DONNEES UTILISEES	49
Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	51
Chapitre IV. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES QUANTITATIFS	52
Chapitre V. ANALYSE ET TRAITEMENT DES RESULTATS QUALITATIFS	65
Partie IV : DISCUSSION ET RECOMMANDATION	72
Chapitre VI. EVALUATION DES RESSOURCES DISPONIBLES	73
Chapitre VII. BESOINS EN EAU ET LEUR EVOLUTION	77
CONCLUSION GENERALE	89
BIBLIOGRAPHIE	92
ANNEXE	i
TABLE DE MATIERE	
RESUME	

ACRONYME

AEP : Adduction d'Eau Potable

BV : Bassin Versant

Dir. : Direction

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

I : Infiltration

INSTAT : Institut National de la Statistique

JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy

Km² : Kilomètre carré

Km³ : Kilomètre cube

MEAH : Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène

MNP : Madagascar National Park

ODD : Objectif de Développement Durable

ONU : Organisation des Nations Unies

PIC : Pôle Intégré des Croissance

PUDi : Plan d'Urbanisme Directeur

R : Ruissellement

S : Stock

WAVES : Wealth Accounting and Valuation of Ecosystem Services

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cycle de l'eau dans le monde.....	7
Figure 2 : Carte des réseaux hydrographiques et des grands bassins versants de Madagascar	12
Figure 3 : Les huit zones hydrogéologiques et les principales nappes aquifères de Madagascar.....	13
Figure 4 : Les qualités des eaux à Madagascar.....	14
Figure 5 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	21
Figure 6 : Carte d'occupation du sol.....	23
Figure 7 : Carte isohyète de montagne d'Ambre.....	24
Figure 8: Carte hydrographique de Besokatra.....	26
Figure 9 : Extrait de la carte pédologique à l'échelle 1/200 000.....	28
Figure 10 : Organigramme du travail de la présente étude.....	40
Figure 11 : Présentation de l'Arcmap.....	41
Figure 12 : Présentation de l'Arcatalog.....	42
Figure 13 : Arctoolboox.....	42
Figure 14 : Méthode de géoréférencement.....	43
Figure 15 : Technique de vectorisation.....	44
Figure 16 : Mode d'intégration des coordonnées GPS dans le SIG.....	45
Figure 17 : Remplissage des champs X, Y et Z.....	45
Figure 18 : Comparaison de la température moyenne à la normale entre 2002 à 2013.....	54
Figure 19 : Quantités de pluie entre 2001 au 2013 par rapport à la normale.....	55
Figure 20 : Droite de tendance de la précipitation annuelle.....	57
Figure 21 : Carte de localisation des profils géophysiques.....	60

Figure 22 : Modèle en 2D du panneau électrique du puits n°1.....	61
Figure 23 : Structure du sous-sol sur le deuxième panneau.....	62
Figure 24 : Structure du du sous-sol sur le troisième panneau.....	63
Figure 25 : Carte géologique de la zone d'étude.....	65
Figure 26 : Carte de fracturation.....	66
Figure 27 : Diagramme de distribution des linéaments.....	68
Figure 28 : Carte de synthèse.....	71
Figure 29 : Carte d'étendue de la culture de khat en amont du captage de Besokatra.....	79



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Population dans la Commune urbaine de Diégo Suarez.....	19
Tableau 2 : Fréquence de Ramy, Hasina et Harongana dans la forêt dense.....	22
Tableau 3 : Les principales occupations du sol du bassin versant.....	22
Tableau 4 : Principaux paramètres climatiques de la Montagne d'Ambre.....	24
Tableau 5 : Principales caractéristiques du bassin versant de Besokatra.....	26
Tableau 6 : Caractéristiques hydrologiques de la Montagne d'Ambre.....	27
Tableau 7 : Caractéristiques des conduites d'Adduction.....	32
Tableau 8 : Caractéristiques des réservoirs.....	34
Tableau 9 : Caractéristiques des conduites du réseau de distribution.....	35
Tableau 10 : Coefficient de correction.....	47
Tableau 11 : Température moyenne mensuelle Montagne d'Ambre.....	53
Tableau 12 : Précipitation mensuelle et annuelle entre 2001 et 2013.....	56
Tableau 13 : L'évapotranspiration.....	58
Tableau 14 : Insolation.....	59
Tableau 15 : Résultat récapitulatif des différentes fractures identifiées.....	67
Tableau 16 : Résultats statistiques des fractures.....	68
Tableau 17 : Rapport d'analyse physico-chimique de la rivière Besokatra.....	70
Tableau 18 : Débits estimatifs des canaux.....	73
Tableau 19: Stock d'eau moyen mensuel et moyen annuel.....	74
Tableau 20 : Potentialité en eau souterraine dans le bassin de Besokatra.....	75
Tableau 21 : Flux d'eau mensuel géré par la JIRAMA.....	82

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Basalte trouvé en chemin vers le Sud (Ankarana).....	29
Photo 2 : Barrage JIRAMA : rehaussement du seuil du barrage.....	31
Photo 3 : Limnimètre installé en rive gauche.....	32
Photo 4 : Bassin de décantation.....	33
Photo 5 : Filtres à sable.....	33
Photo 6 : Bâche de reprise de 200m ³	34
Photo 7 : L'un des canaux irrigués et les activités dans la région d'Anjavona.....	74
Photo 8 : Champs de khat à Anjavona.....	78
Photo 9 : Vue générale de la zone d'étude.....	78

GLOSSAIRE

ETP : évapotranspiration potentielle

On groupe sous le nom d'ETP l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration. A l'échelle d'un Bassin Versant, c'est donc la hauteur de lame d'eau « évapotranspirée », pendant une période déterminée.

ETR : évapotranspiration réelle

C'est l'évapotranspiration qui apparaît dans les conditions réelles existantes. C'est ainsi la quantité d'eau retournant réellement dans l'atmosphère.

I : infiltration

C'est l'estimation en hauteur d'eau qui s'infiltré dans le sol à partir de la pluie qui reste après le départ de l'évapotranspiration réelle, quand le sol n'est pas encore saturé et que le ruissellement n'a pas encore commencé.

R : ruissellement (excédents)

L'excédent des précipitations et de l'évapotranspiration est emmagasiné dans la zone d'aération du sol pour augmenter le stock jusqu'à ce que ce dernier soit saturé. Cette excédent dépasse la réserve stock cumulée de 100 mm, et participe à l'écoulement de surface et des nappes profondes.

S : stock

C'est la réserve d'eau contenue dans la zone d'aération du sol, elle constitue l'humidité du sol et c'est cette réserve que les racines des végétaux mobilisent. Elle dépend essentiellement de la structure du terrain et de sa couverture végétale.

Δs : variation du stock

Thornthwaite fait l'hypothèse que le stock est plein à 100 mm et diminue dans le temps du fait de l'évapotranspiration. Quand il y a un apport de pluie supérieur à l'évapotranspiration, le stock va augmenter pour tendre vers 100 mm. C'est ce qui est appelé « variation du stock ».

INTRODUCTION

Quel que soit le milieu, l'eau reste une ressource indispensable à la vie. Le manque d'accès à l'eau est la première cause de mortalité au monde. Face à cet enjeu, la communauté internationale s'est donnée comme Objectifs du Développement Durable (ODD) de réduire de moitié, d'ici 2015, la proportion de la population mondiale n'ayant pas accès durable à l'eau. A quelques années de l'échéance fixée par l'ODD, le constat est alarmant. L'Afrique, en revanche, reste sur le banc de touche. L'objectif ne sera pas atteint avant 2040.

Selon les chiffres de l'Annuaire 2013 du Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène, le taux de desserte en eau potable au niveau national a augmenté de 17%, entre 2000 et 2012. Cela représente une progression légèrement inférieure à 1,5% par an. En 2012, le taux de desserte, pour l'ensemble du territoire, était de 46% (MEAH, 2014). Face à ces considérations, Antsiranana est un cas particulier, puisque le taux de desserte actuel est déjà très élevé. A partir des statistiques d'exploitation de la JIRAMA, le taux de desserte actuel serait de 79,1%. Son accroissement annuel, plus faible, sera d'environ 1,3 à 1,5% par an. Pour l'atteinte des 100% en 2030, cela demeure malheureusement bien théorique, puisque le développement des branchements dépendra de l'évolution du niveau de vie de la population et donc du développement économique.

Suite à ce constat, Madagascar par le biais du Ministère de l'eau, de l'Assainissement et de l'hygiène fait face à de nouveaux défis qui requièrent une nouvelle approche de la gestion des ressources en eau. C'est pourquoi le gouvernement malgache, par l'intermédiaire du projet PIC (Pôle Intégré de Croissance), réalise une réhabilitation et une extension de l'adduction d'eau potable dans la ville d'Antsiranana I.

Or, depuis 1925, la ville d'Antsiranana a été dotée d'une alimentation en eau, qui, initialement, exploitait l'eau des barrages d'Ambodimanga. Depuis les années 60, les ressources d'Ambodimanga ne couvrent plus la demande de la population. La production a été faite à partir du barrage sur la rivière Besokatra, équipé d'un premier ouvrage de prise d'eau malgré son statut d'Aire Protégée. Actuellement, il semblerait que ce système n'arrive pas à couvrir les besoins en eau de la population à cause de la forte croissance démographique et des extensions de la ville vers le Sud. C'est la raison pour laquelle la présente étude a été menée dans le but d'évaluer et de cartographier les ressources en eau dans le bassin versant de Besokatra afin de contribuer à une meilleure connaissance de la dynamique de cette région, puis d'esquisser une carte de potentialité

en eau pour gérer correctement ces ressources et de trouver la solution pour le problème de l'alimentation en eau dans la ville d'Antsiranana. Sur ce, ce constat a permis de choisir le thème : « **Analyse de la situation des ressources en eau sur la partie orientale de la Montagne d'Ambre - Cas de la rivière Besokatra** ».

Pour ce faire, ce mémoire est divisé en quatre parties :

- dans la première partie, sont présentées les généralités sur les ressources en eau à travers le monde, à Madagascar et plus spécifiquement dans la Montagne d'Ambre ;
- en seconde partie est développé la méthodologie d'approche proposée pour gérer ces problèmes dont les outils tels le logiciel de cartographie et d'analyse;
- la troisième partie présente les résultats des travaux et leur interprétation ;
- enfin, la quatrième partie est consacrée aux discussions et autres recommandations.

Une conclusion générale termine cette analyse de la situation autour de la Montagne d'Ambre d'Antsiranana.

PARTIE I

GENERALITES

Chapitre I. CONTEXTE GENERAL

I. 1- Généralités sur l'eau

Comme tout le monde le sait, la planète terre est également appelée planète bleue ; ceci provient du fait que sa surface est recouverte à 72% d'eau. L'eau existe en quantité immuable depuis des millénaires, dans le monde nous pouvons en compter 1400millions de km³. C'est une quantité phénoménale.

En effet, cette quantité d'eau colossale n'est pas à 100% propre à la consommation. La plus grande partie, 97,5% selon les sources, est de l'eau de mer et le reste, 2,5 est de l'eau douce (répartie de manière suivante : 68% glaciers et neiges éternelles, 29% eaux souterraines, 0,3% lacs et rivières enfin le reste dans les mares, humidités des sols...).

L'eau est le principal composant des matières et des êtres vivants : elle est la vie. Par la dissociation de la molécule de dihydrogène et de l'oxygène sous l'action de la chaleur, l'eau se forme. Elle est en relation étroite avec le climat, la géomorphologie du continent ou du pays considéré et la géologie.

I. 1.1- Origine de l'eau

L'eau peut se présenter en différents types : les eaux des pluies, les eaux de surfaces et les eaux souterraines. C'est un élément essentiellement mobile, en mouvement permanent tant verticalement que transversalement ou encore oblique. En effet ce trajectoire forme une boucle d'où la notion du cycle de l'eau.

I. 1.2- Cycle de l'eau etc.....

Le cycle de l'eau, alimenté en énergie par la machine thermique solaire, fait s'évaporer l'eau depuis les continents et les océans, la fait transiter quelques jours dans l'atmosphère, puis retomber en pluie (<http://ga.water.usgs.gov>).

La circulation de l'eau entre les océans, l'atmosphère et les continents est appelée cycle de l'eau. Ce cycle se déroule dans une enveloppe superficielle de la terre appelée l'hydrosphère. Le cycle de l'eau débute par l'évaporation principalement des océans mais aussi des continents. Cette eau transite dans l'atmosphère où elle réside en moyenne 8 à 10 jours et retombe sous forme de

pluie sur les océans ou forme de pluie ou de neige sur les continents. L'évaporation de l'eau à partir des continents porte également le nom d'évapotranspiration. Sur les continents, l'eau s'évapore directement à partir des lacs, des rivières... des sols humides mais à cette évaporation directe s'associe la transpiration des végétaux qui renvoie vers l'atmosphère l'eau de pluie qui s'est infiltrée dans le sol. L'infiltration de l'eau dans le sol sert à constituer le stock superficiel alimentant l'évaporation directe et la transpiration des végétaux. Les fortes précipitations des périodes hivernales engendrent une infiltration profonde qui alimente les nappes souterraines. Sur les continents, les quantités d'eau qui s'évaporent (évapotranspiration) sont inférieures aux quantités d'eau reçue par les précipitations, à l'inverse pour les océans l'évaporation est supérieure aux précipitations. L'excédent en eau des continents retourne aux océans par les rivières, les résurgences de nappes souterraines et le ruissellement côtier. Le cycle de l'eau est ainsi équilibré (Figure 1).

Le cycle de l'eau est donc une histoire immuable qui n'a ni début ni fin. L'eau sur la terre se renouvelle en permanence et y circule en un cycle ininterrompu de 21 jours depuis la nuit des temps. Sans cesse régénérée et toujours différente, l'eau que nous buvons aujourd'hui est donc celle qui a connue l'histoire de la terre.

I. 2. Les eaux de pluies ou eaux météoriques

Les précipitations sont toutes l'eau météorique qui tombe sur la surface de la terre tant sous forme liquide que sous forme solide. C'est une source primaire d'eau douce. Par des précipitations efficaces, l'eau de pluie alimente à la fois les nappes souterraines par l'infiltration efficace (**I**) et les réseaux de surface par le ruissellement (**R**).

La pluie tombée peut être mesurée ou quantifiée à l'aide d'un pluviomètre ou d'un pluviographe à une station d'observations. Les précipitations exprimées en hauteur de pluie en millimètre indiquent la pluie globale précipitée dans un intervalle de temps (journalière, mensuelle, annuelle) de la région et par unité de surface.

I. 3. Les eaux de surface

L'eau de surfaces inclut : les eaux des ruisseaux, des rivières et fleuves, les glaciers, des lacs, les marais et les étangs.

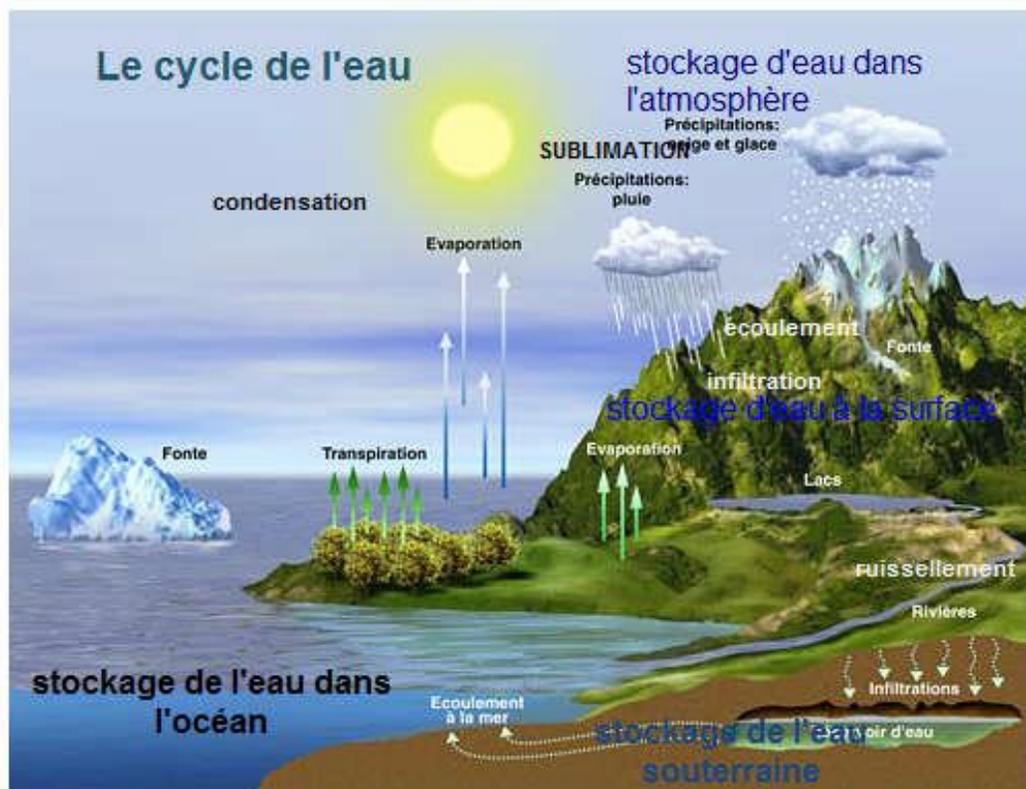


Figure 1: Cycle de l'eau dans le monde

I. 3.1. Les eaux de fleuves et de rivières

Les fleuves et les rivières sont des cours d'eau. Les fleuves coulent en descendant d'une région élevée (l'amont) vers une région basse (l'aval) et se jettent dans la mer au niveau d'une embouchure mais les rivières se jettent finalement dans les fleuves. Les fleuves ont des origines différentes appelées régimes (glaciaire, nival et pluvial). Les fleuves reçoivent des affluents et des confluents qui viennent grossir leur débit avant de se jeter dans la mer par l'intermédiaire d'un estuaire ou d'un delta.

Les rivières diffèrent selon le climat, la nature des roches et du sol ainsi que de la végétation qu'elles traversent. Il existe trois sortes de rivières :

- les rivières souterraines ;
- les rivières torrentielles ;
- les rivières temporaires.

L'eau des rivières et des fleuves transforme le paysage, creuse le lit le long de leur parcours. Les cours d'eau ont un débit soit faible ou élevé. Madagascar dispose plus de 3.000 km environ de fleuves et rivières réparties dans 5 unités hydrologiques (source : Chaperon et al).

I. 3.2. Les lacs, étangs et marais

Un lac est, de manière générale, une grande étendue d'eau entourée de terre, où il suffit que la profondeur, la superficie, ou le volume soit suffisant pour provoquer un dépôt de sédiments et/ou une stratification ou une dépression, une rupture de l'écorce terrestre remplie d'eau. Les eaux de ces réservoirs peuvent alimenter les nappes souterraines par le système lac – eaux souterraines. Certaines sont des affleurements des nappes d'eau souterraines.

Un marais est un type de formation paysagère au relief peu accidenté où le sol est recouvert, en permanence ou par intermittence, d'une couche d'eau stagnante, en général peu profonde, et couverte de végétations. On parle de zone humide. Les marais se forment dans des zones mal drainées par le réseau hydrographique, et à sous-sol imperméable.

Un étang est une étendue d'eau stagnante, peu profonde, de surface relativement petite (jusqu'à quelques dizaines d'hectares), résultant de l'imperméabilité du sol. La formation d'un étang nécessite une alimentation en eau et un sol assez imperméable ou une communication avec la nappe phréatique.

I. 4. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont constituées par toutes les eaux contenues dans le sol et sous - sol.

On peut distinguer : les eaux adsorbées, pelliculaires et de rétention, non mobilisables par gravitaire ; les eaux gravifiques ou gravitaires.

Ces dernières constituent les nappes souterraines (Castany et al, 1977).

I. 5. Les ressources en eau à Madagascar

I. 5.1. Les ressources en eau de surface

I. 5.1.1. Les réseaux hydrographiques

La plupart des rivières de Madagascar prennent leurs sources sur les Haut-plateaux et s'écoulent vers l'Ouest, vers le Sud et vers l'Est.

Les rivières de l'Ouest descendent rapidement des Hauts-plateaux en charriant une quantité énorme de matières en suspension et colloïde argileuse et s'écoulent ensuite dans de larges lits boueux pour se jeter dans le Canal de Mozambique par des deltas vaseux à palétuviers.

Les rivières du Sud ont des régimes d'Oued, à très faible écoulement voire nul en saison sèche, avec des crues violentes de courte durée lors d'une grosse pluie.

Les rivières de l'Est ont de gros débits et sont en général courtes. Elles ont aussi des eaux chargées d'argiles.

Il existe certaines rivières à régime mixte.

I.5.1.2. Les lacs

Les principaux lacs malgaches sont :

- sur les Hauts-plateaux : le lac Alaotra d'origine tectonique, le lac Itasy et le lac Andraikiba, tous les deux liés au volcanisme quaternaire ;
- dans le bassin sédimentaire de l'Ouest : le lac Kinkony, le lac Hima, le lac Ihotry et le lac Tsimanampatsotsa.
- dans l'Extrême-Sud : le lac salé Ihodo.

I. 5.2. Contexte hydrographique

L'organisation régionale des régimes hydrologiques apparaît assez clairement à partir des relations hydro-pluviométriques. La sectorisation des régimes correspond à la sectorisation climatique. L'influence des facteurs conditionnels non climatiques (géomorphologie et végétation) est prépondérante (annexe I tableau III).

Cinq grandes unités peuvent être identifiées :

I. 5.2.1- Les régimes du Nord

Ils y existent quelques petits écoulements issus du massif volcanique crétaé du bassin de Diego. On peut distinguer:

- le régime de l'extrême Nord et la montagne d'Ambre
- le régime du massif de Tsaratanana et de ses bordures

-
-
- le régime d'un petit secteur Nord-Est intermédiaire entre ces deux massifs.

Dans l'ensemble, les cours d'eau présentent des formes très allongées avec des fortes pentes et des superficies réduites inférieures à 100km². Ces fleuves sont : Besokatra, Saharenana, Tsaratanana et Lokoho.

I. 5.2.2- Le régime du versant Est

Le débit de crue est très élevé ainsi que de l'étiage 13 à 30 litres au km²/seconde. Les principales rivières sont : Maningory, Mangoro et Mananara. Elles ont des eaux chargées d'argile.

I. 5.2.3. Les régimes des Hautes-Terres

Les plus grands fleuves sont : Betsiboka, Tsiribihina, Mangoky. Les crues décennales de l'ensemble sont de 180 L/s/km² quant à l'étiage le débit est estimé à 3 à 8 L/s/km² ;

I. 5.2.4- Les régimes des pentes occidentales :

Les rivières de l'Ouest descendent rapidement des hauts plateaux en charriant une quantité énorme de matières en suspensions et colloïdes argileux et s'écoulent ensuite dans les larges lits boueux pour se jeter dans le canal de Mozambique par les deltas vaseux à palétuviers. On a le Sofia, Betsiboka, Mahavavy, Manambolo, bassin inférieur de la Tsiribihina. Le débit de crue est de l'ordre de 850L/s/km² et l'étiage débite à 1 à 2 L/s/km².

I. 5.2.5 Le régime du sud-ouest :

Les plus grands fleuves sont le Mangoky et l'Onilahy dont le débit de crue est 1000 L/s/km² et ce de l'étiage 4 à 6 L/s/km².

I. 5.2.6 Les rivières du Sud

Elles ont des régimes d'oued à très faible écoulement voire nul en saison sèche, avec des crues violentes de courte durée lors d'une grosse pluie.

Tous ces fleuves sont en écoulement permanent toute l'année.

I. 5.2.7 Les bassins versants

Les bassins versants associés à ces régimes hydrologiques peuvent être classés selon le type de substratum et le régime du drainage. On peut distinguer cinq bassins versants pour l'ensemble de l'île (Annexe, Tableau IV) :

- le versant de la montagne d'Ambre présente une superficie de 11200 Km² et est drainé par les rivières Irodo, Saharenana et Besokatra. La forme allongée et la forte pente caractérisent ce bassin de la montagne d'Ambre ;

- le versant oriental, a une superficie de 150000 km². Ce bassin s'étend sur 1200 km d'Antalaha à Taolagnaro. Les plus grands fleuves sont Mahavavy, Sambirano, Maevaroano, Bemarivo et Lokoho ;

- le bassin versant occidental a une superficie de 365000 km². Ce bassin versant présente une morphologie en pente modérée et des exutoires en deltas.

- le versant sud avec une superficie de 49000 km² est caractérisé par sa forme étroite en vallée tectonique d'orientation nord-sud ;

- le versant de Tsaratanana (20000 km²) repose sur des socles granitiques et des terrains volcaniques. Les bassins ont de formes centrifuges à pente initiale forte et à relief vigoureux.

On note que ces cinq bassins versants ont été modifiés ou subdivisés en plusieurs sous bassins (Rakotondrainibe J. H 1982) (Figure 2).



Figure 2: Carte des réseaux hydrographiques et des grands bassins versants de Madagascar

I. 5.3. Hydrogéologie

Madagascar comprend huit zones hydrogéologiques : les socles fracturés des Hauts plateaux, les zones volcaniques de la partie sud des Hauts plateaux, le bassin sédimentaire de l'Extrême sud, bassin sédimentaire de Tuléar, bassin sédimentaire de Morondava, Mahajanga et Diego, le sable de plage de la côte Est (figure 3). On estime 140.10^6 m³ d'eau souterraine pour l'ensemble de l'île.

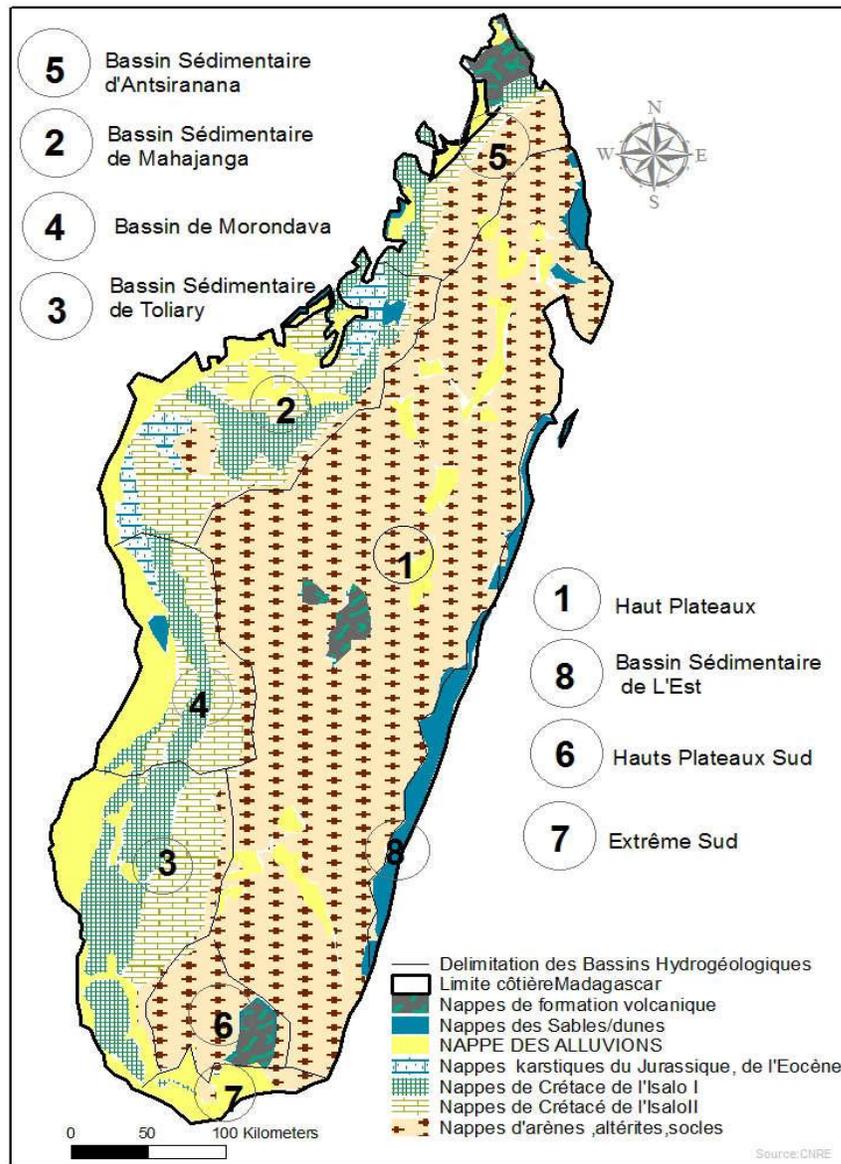


Figure 3 : Les huit zones hydrogéologiques et les principales nappes aquifères de Madagascar. Source : Rakotondrainibe H. (2006)

Toutes les eaux de ces nappes sont de très bonne qualité. Toutefois, la chimie des eaux de Madagascar peut être classée en trois grandes familles selon leur qualité :

- les eaux très faiblement minéralisées : hauts plateaux cristallins résistivité autour de 10000 Ω cm ;
- les eaux normalement minéralisées 10000 < résistivité < 10000 Ω cm Côte Est et Côte Ouest ;

- les eaux fortement minéralisées à résistivité autour de 1.000Ω cm de l'Extrême Sud.

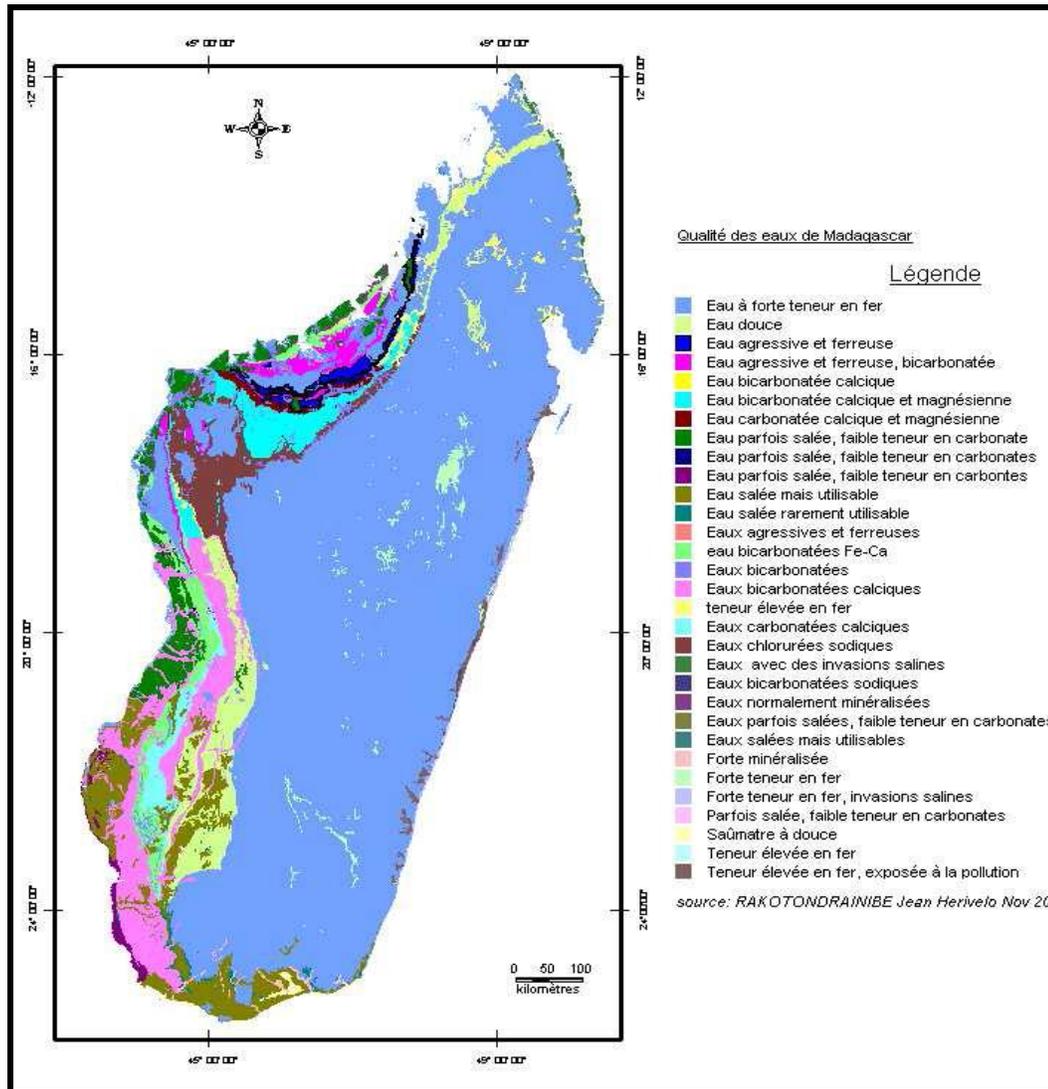


Figure 4 : Les qualités des eaux à Madagascar

En règle très générale, les eaux de Madagascar sont toutes bicarbonatées riches en NCO_3 , Fe. Les eaux Eocène et du Jurassique ainsi que les eaux des terrains récents sont calciques et magnésiennes.

Chapitre II. PROBLEME DES RESSOURCES EN EAU FACE AUX ALEAS

II. 1- Les végétaux

Les végétaux limitent l'impact érosif des pluies d'orage, dont les eaux n'ont pas le temps de s'infiltrer et ruissellent. La répartition des végétaux dépend elle-même de l'abondance des précipitations et de leur répartition sur l'année. Par ailleurs, l'Homme, en contrôlant la végétation, conditionne indirectement l'impact de l'hydrosphère sur la géosphère. Par exemple, la déforestation en milieu équatorial a souvent des conséquences catastrophiques : érosion des sols, formation d'une croûte latéritique stérile, coulées de boues...

II. 2- L'homme

L'Homme peut aussi modifier la répartition, la composition chimique et la circulation de l'hydrosphère par ses activités telles que la construction de plans d'eau, de canaux artificiels, de digues, de barrages... entre autre par la pollution. Toutes ces actions ont des conséquences sur la géosphère. Par exemple, les barrages diminuent la vitesse du courant en amont, d'où une sédimentation, tandis qu'en aval, la circulation de substances dissoutes est privilégiée. L'abondance des barrages, véritable pièges à sédiments, a provoqué un changement du type de sédimentation sur les plateaux continentaux océaniques où arrivent les fleuves ; la baisse de l'apport d'éléments en suspension, à l'origine d'une sédimentation détritique. Les engrais (nitrates), lessivés par les eaux d'infiltration, chargent les eaux des rivières et des côtes, modifiant les équilibres des écosystèmes (développement des algues vertes sur le littoral, eutrophisation des lacs). Donc, des actions incontrôlées peuvent conduire à des dommages irréversibles à l'échelle de temps de la vie humaine : désertifications, eaux impropres à la consommation ou à la vie car la quantité d'eau disponible pour la consommation humaine est globalement limitée, et localement très variable.

II. 3- Les impacts du changement climatique sur la biosphère et la géosphère

Quels que soient les milieux, l'eau est une ressource indispensable à la vie. La disponibilité de l'eau, problème crucial en milieu aérien, conditionne la répartition des êtres vivants. Elle dépend de facteurs atmosphériques (précipitations), géologiques (taille et répartition des continents sur le globe, composition des sols et roches, fracturation des roches, perméabilité, porosité, infiltration,

ruissellement, circulation et rétention de l'eau), biosphériques (composition du sol, nature et abondance de la végétation). Le manque d'eau limite considérablement le développement de la biosphère (zones arides ou désertiques).

Inversement, l'excès d'eau peut aussi nuire au développement de la biosphère : c'est le cas lors d'inondations, qui dépendent de conditions atmosphériques, mais aussi du contexte géologique et de l'action humaine. Par exemple, lors des précipitations abondantes, les surfaces bétonnées ou bituminées, toujours plus étendues, empêchent l'infiltration de l'eau dans les sols, processus qui jouent un rôle régulateur. Les eaux ruissellent alors rapidement en surface, avec des conséquences catastrophiques sur la biosphère et la géosphère (érosion).

Il est probable que les influences anthropiques affectent le cycle mondial de l'eau depuis 1960 et ont contribué aux augmentations du contenu atmosphérique en vapeur d'eau, à des changements de la distribution spatiale des précipitations sur les continents à l'échelle du globe, à l'intensification des épisodes de fortes précipitations sur les régions continentales et à des changements de salinité océanique en surface et en sub-surface (très probable).

L'évolution des précipitations liées au changement climatique a des conséquences pour la désertification. En effet, le manque de précipitations dans certaines régions va conduire à l'assèchement des sols. Les propriétés des sols vont également être impactées par le changement des températures, avec des conséquences graves sur l'agriculture dans ces régions.

II. 4- Les impacts sur l'accès à la ressource en eau

Les agents climatiques qui jouent un rôle dans la disponibilité de la ressource en eau sont essentiellement les précipitations, la température et l'évaporation. Les débits hivernaux devraient augmenter et les débits printaniers diminuer. L'accroissement du ruissellement, dans certaines régions, ne pourra être profitable qu'à condition qu'il existe des infrastructures adaptées au captage et au stockage de cette eau supplémentaire. La disponibilité de la ressource en eau est également affectée par des facteurs non climatiques comme le changement d'affectation des terres, la construction et la gestion de réservoirs, l'émission de polluants, le traitement des eaux usées, mais aussi par l'usage fait de la ressource. Le changement climatique est un facteur additionnel qui vient influencer le stress hydrique bien que les facteurs socio-démographiques restent les principaux déterminants du stress hydrique.

Si l'accès sûr à l'eau potable dépend plus des infrastructures que de la quantité de ruissellement et de la capacité de renouvellement des nappes phréatiques, la diminution de ces dernières dans certaines régions, du fait du changement climatique, rend plus difficile et plus coûteux la concrétisation de l'accès à l'eau potable pour tous.

Mesurer les impacts des changements hydrologiques liés au réchauffement climatique est un exercice très difficile du fait des incertitudes liées à la grande variabilité du cycle et la nature hydrologique car de manière générale, les effets négatifs du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau seront supérieurs aux effets positifs.

L'augmentation de l'incertitude est donc en elle-même l'impact principal du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau avec des conséquences qui peuvent être importantes sur la gestion de l'eau. L'ensemble des acteurs de l'eau doit donc apprendre à gérer cette incertitude croissante en mettant en œuvre des outils de gestion adaptés à cette nouvelle donnée.

II. 5- La Gestion Intégrée de Ressources en Eau (GIRE)

L'eau est une ressource unique aux usages concurrents. Elle est censée subvenir à des besoins sociaux, environnementaux et économiques. Devant la pénurie croissante de l'eau exacerbée par l'explosion démographique et l'urbanisation, la mauvaise affectation des ressources, la dégradation de l'environnement et la mauvaise gestion des ressources en eau, l'ONU et surtout les pays africains membres font face à de nouveaux défis qui requièrent une nouvelle approche de la gestion des ressources en eau.

La gestion de l'eau est complexe, recouvre plusieurs niveaux et nécessite un cadre global car elle vise essentiellement à promouvoir un développement efficace, équitable et durable à travers une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) qui est un précieux outil du développement durable adopté par le pays.

Les stratégies intégrées de gestion de l'eau qui donnent de bons résultats demandent, entre autres, de tenir compte de l'opinion publique, de réformer les processus de planification, de coordonner la gestion des ressources en sol et en eau, de reconnaître les liens entre quantité et

qualité de l'eau, d'utiliser en parallèle les eaux souterraines et les eaux de surface, de protéger et de restaurer les milieux naturels, en incluant la prise en compte du changement climatique.

Afin de garantir l'efficacité et la durabilité de la gestion de l'eau, il faudrait la décentraliser jusqu'au niveau approprié le plus bas et dans l'espace géographique le moins étendu. Pour une gestion efficace des ressources en eau, il importe de séparer les aspects d'aménagement et de réglementation des ressources en eau des fonctions de fourniture d'eau et d'assainissement.

II. 5.1. Le consensus international sur la GIRE

Il porte essentiellement sur les quatre principes suivants :

- l'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, essentielle pour préserver la vie, le développement et l'environnement ;
- l'exploitation et la gestion de l'eau doivent se fonder sur une approche participative, impliquant les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs à tous les niveaux ;
- les femmes jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement, la gestion et la préservation de l'eau ;
- l'eau a une valeur économique dans toutes ses utilisations concurrentes et doit donc être reconnue comme un bien économique.

Chapitre III. ZONE D'ETUDE

Il est vrai que la rivière de Besokatra se situe dans la montagne d'Ambre mais elle est utilisée pour servir la population de Diégo – Suarez ou Antsiranana I actuellement.

III. 1. Contexte général

III. 1.1. Description de la ville d'Antsiranana I

Antsiranana I se trouve à l'extrême nord de Madagascar, chef-lieu de région DIANA. Sa population compte 182032 habitants, répartie en 25 Fokontany du tableau 1.

Tableau 1 : Population dans la commune urbaine de Diégo Suarez (Source : Bureau Région DIANA, (2015))

Fokontany	Population
Cap Diégo	2536
Anamakia	6556
Place Kabary	7739
Avenir	6823
Lazaret Nord	8808
Lazaret Sud	7523
Morafeno	7982
Bazar Kely	7631
Tanambao Nord	8269
Tanambao Sud	5402
Soafeno	8131
Scama	8669
Ambalavola	8968
Grand Pavois	6668
Tanambao III	6662

Tanambao IV	6650
Tanambao V	7888
Tanambao Tsena	8049
Tsaramandroso	5695
Ambohimitsinjo	7654
Ambalakazaha	7169
Mahatsara	7322
Cité Ouvrière	8219
Mangarivotra	6619
Manongalaza	8404
Total	182032

III. 1.2. Localisation particulière de la Montagne d'Ambre

Tout d'abord, il est important de faire la description de Montagne d'Ambre car le Bassin de Besokatra se trouve dans cette zone (figure 5).

La Montagne d'Ambre occupe l'extrême Nord de l'île, culmine à 1475 m et fait partie d'un parc national de Madagascar. Elle se trouve dans la Région DIANA, et s'inscrit dans le District d'Antsiranana II, Commune rurale de Joffre - Ville. Ensuite, elle se localise à environ 45 km de la ville d'Antsiranana I, entre les 12°31' à 12°44' de latitude Sud et les 49°03' à 49°13' de longitude Est. La Montagne couvre une superficie de 23 010 ha dont :

- 18200 ha pour le Parc National,
- 4810 ha pour la Réserve Spéciale Forêt d'Ambre.

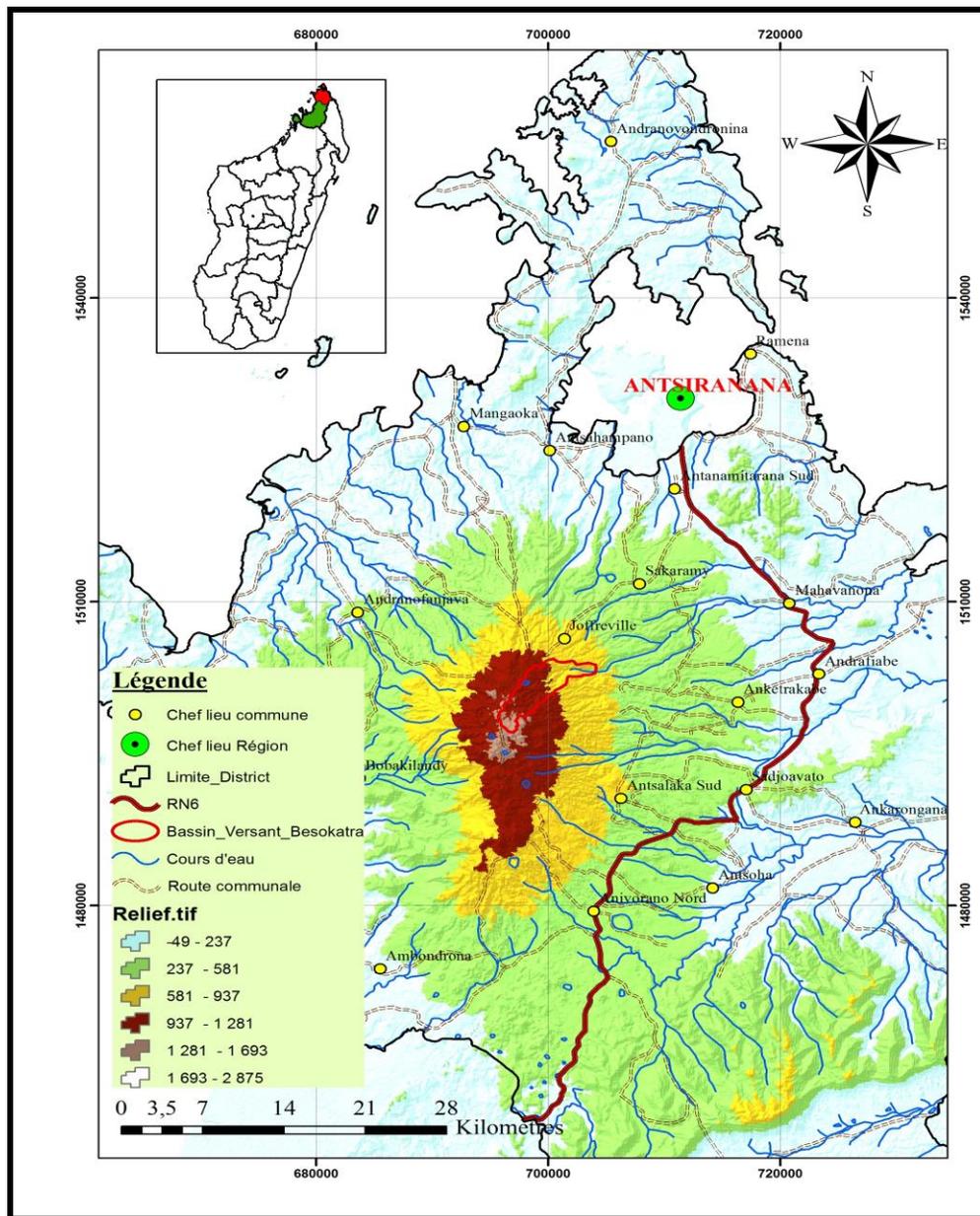


Figure 5 : Carte de localisation de la zone d'étude. Source : BD 100 (2015)

III. 1.3. Occupation

La Montagne d'Ambre est recouverte d'une forêt ombrophile dense de faible extension au sommet, tandis que les flancs sont le domaine d'une végétation à tendance xérophytique (futaie claire peu élevée), ayant subi des défrichements conséquents.

La majorité de la surface du bassin versant est occupée par de forêt dense et humide composée de 31 variétés (essences) d'arbre naturelle dont la densité est de l'ordre de 548 pieds par hectare. Les essences dominantes sont : le Ramy, Hasina et Harongana ; le Tableau 2 montre la fréquence de ces essences dominantes dans la forêt dense.

Tableau 2 : Fréquence de Ramy, Hasina et Harongana dans la forêt dense. Source MNP (2015)

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Famille	Fréquence %
Ramy	Canarium madagascariensis	Burceraceae	11,67
Hasina	Oncostemon lichenophylum	Myrcinaceae	17,84
Harongana	Harungana madagascariensis	Hypericaceae	9,32

En plus de la forêt dense, le bassin comprend aussi des forêts artificielles dont la majorité est des essences eucalyptus rostrata ainsi que des champs de cultures généralement occupés par de khats. Des lacs de dimension significative dans le bassin occupent une surface totale de 628 m². L'occupation du sol est résumée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Les principales occupations du sol du Bassin Versant. Source MNP (2015)

Occupation du sol	Superficie (ha)	Ventilation en %
Forêts dense humide	2130	95.05
Forêts artificielles	7.28	0.33
Champs de culture : arboriculture, culture vivrière, khat	9.6	0.43
Savane	91.6	4.19
Lac	0.0628	0.00
Superficie totale	2185	100

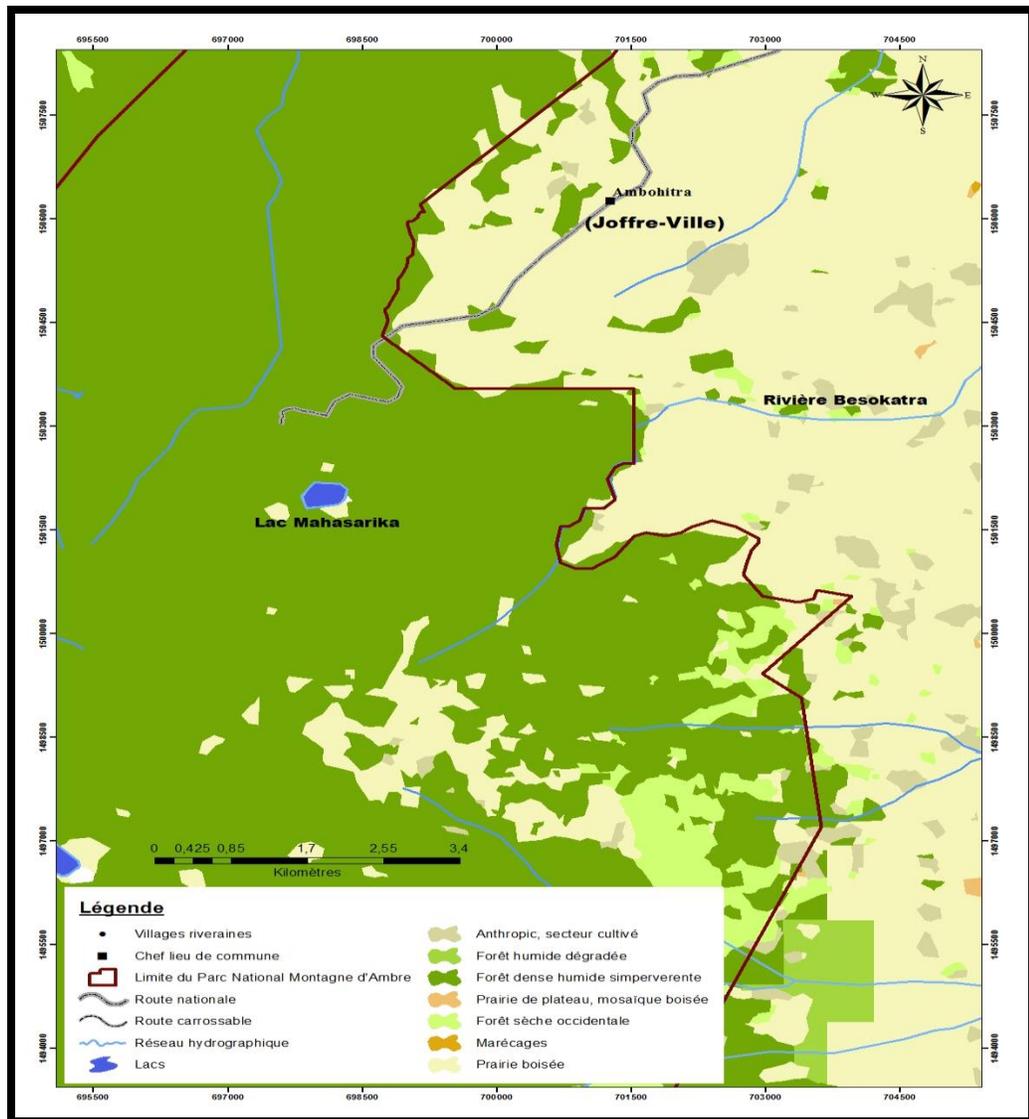


Figure 6 : Carte d'occupation du sol. Source : BD 100 (2016)

III. 2. Géomorphologie et climatologie

Géomorphologiquement, le relief présente deux aspects contrastés, séparés par une barrière Nord-Sud. Il apparaît à l'Ouest, un relief tourmenté, avec des pentes abruptes, alors qu'à l'Est, les pentes sont douces et le relief peu accidenté.

Le climat prédominant dans la région de Montagne d'Ambre est de type tropical humide :

- ✓ une pluviométrie annuelle moyenne de 2 978 mm répartie pendant la saison des pluies de Novembre à Avril.

- ✓ la saison sèche hivernale présente des vents constants de sud-est connu localement sous le nom de “Varatraza”. Ce sont des vents océaniques porteurs de pluies qui arrosent les versants supérieurs de la Montagne d’Ambre pendant la période de sécheresse prolongée sur les régions environnantes en contre bas.

La température présente des extrêmes qui vont de près de 13°C en hiver à plus de 32°C en été. Variant généralement de 20 à 25°C en été, elle peut descendre assez bas en hiver, pour donner une moyenne annuelle de 17,5°C. Sur le sommet, la nuit, la température peut atteindre 3°C. Le mois le plus frais de l’année est le mois de juillet. Le tableau qui suit en présente les principaux paramètres.

Tableau 4 : Principaux paramètres climatiques de la montagne d’Ambre. Source : Programme WAVES (2014)

Température minimale (°C)	Température max (°C)	Température moyenne (°C)	Pluie normale annuelle (mm)	Pluie maximale annuelle (mm)
12,9	32,2	23,1	2350	> 3000

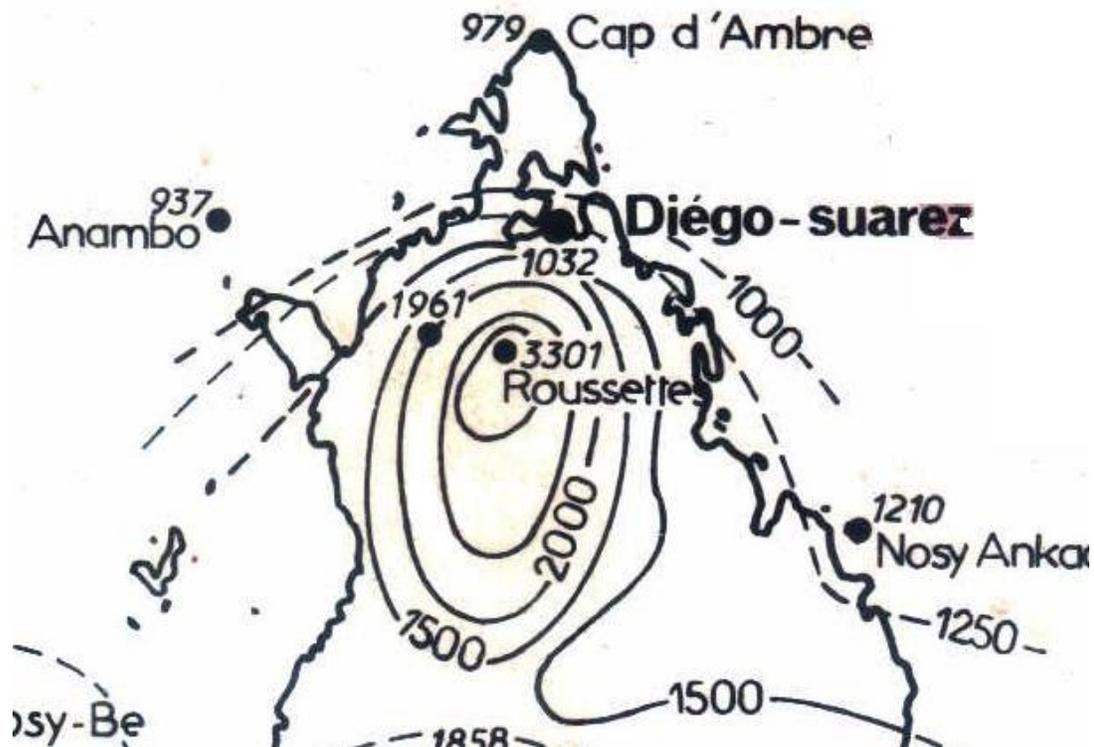


Figure 7 : Carte isohyète de montagne d’Ambre. Source : Chaperon et al. (1993)

III. 3. Contexte hydrogéologique

III. 3.1. Hydrographie

La Montagne d'Ambre est le réservoir d'eau d'Antsiranana. Le réseau hydrographique permet à la ville d'Antsiranana d'avoir aux environs de 50000000 m³/an d'eau potable.

Par ailleurs, l'approvisionnement domestique et industriel en eau pour la ville d'Antsiranana est géré par une centrale de la JIRAMA, installée sur la rivière Besokatra à proximité du village de Joffre-ville et qui se situe en moyenne altitude sur le versant Nord- Ouest de la Montagne d'Ambre.

La pluviométrie abondante chaque année contribue au maintien d'une couverture végétale suffisamment fournie pour jouer le rôle d'éponge, ralentissant le ruissellement et favorisant l'infiltration pour approvisionner les points d'eau et cours d'eau qui alimentent les deux bassins versants Est et Ouest entre Anivorano Nord et Mangaoko ainsi qu'entre Andranotsimaty et Ampasimbengy.

Le Parc National Montagne d'Ambre possède plusieurs cours d'eau dont les plus importants comme : Besokatra, Saharenana, Irodo, Antomboka, Andranofanjava, Sandrapiana, Andongoza, Andohan'Ankarana arrosent les bas-fonds environnants du District d'Antsiranana I et d'Antsiranana II. Les bassins drainés sont généralement de forme allongée et de faible étendue (<100 km²), et présentent de fortes pentes.

De nombreuses cours d'eau prennent leurs sources dans le massif qui mérite bien son nom de réservoir d'eau d'Antsiranana. De part, ces cours d'eau, le relief volcanique offrent des cascades dont les plus célèbres sont : la grande Cascade haute de 80 m, la petite Cascade et une dédiée au peuple Antakarana : la cascade des Antakarana.

Six lacs sont inventoriés dont cinq sont situés au sein du Parc National Montagne d'Ambre et un dans la Réserve Spéciale Forêt d'Ambre : Lac Mahasarika ou Petit Lac, lac Malio ou Grand Lac, Lac Taranta ou Lac Maudit, Lac Fantany, Lac de la Coupe Verte et Lac Manonja ou Lac Texier.

III. 3.2. Caractéristiques géométriques du bassin versant Besokatra

Le bassin versant de Besokatra est un des principaux bassins hydrographiques de la montagne d'Ambre (figure 8). A l'exutoire du barrage de captage de la JIRAMA, il draine sur la façade nord-

est de la montagne d'Ambre dont sa superficie est estimée à 2184 ha au niveau du barrage de la Jirama et son périmètre mesure 32.5 km environ. Le bassin à une altitude maximale 1354 m et altitude minimale 545 m. Les principaux caractéristiques sont donnés dans le tableau ci-après :

Tableau n°5 : Principaux caractéristiques du bassin versant de Besokatra. Source : WAVES, (2014)

Surface (km ²)	Périmètre (km)	Coefficient de forme	Longueur du rectangle équivalent (km)	Largeur du rectangle équivalent (km)
22	35.5	2.14	16.6	1.2

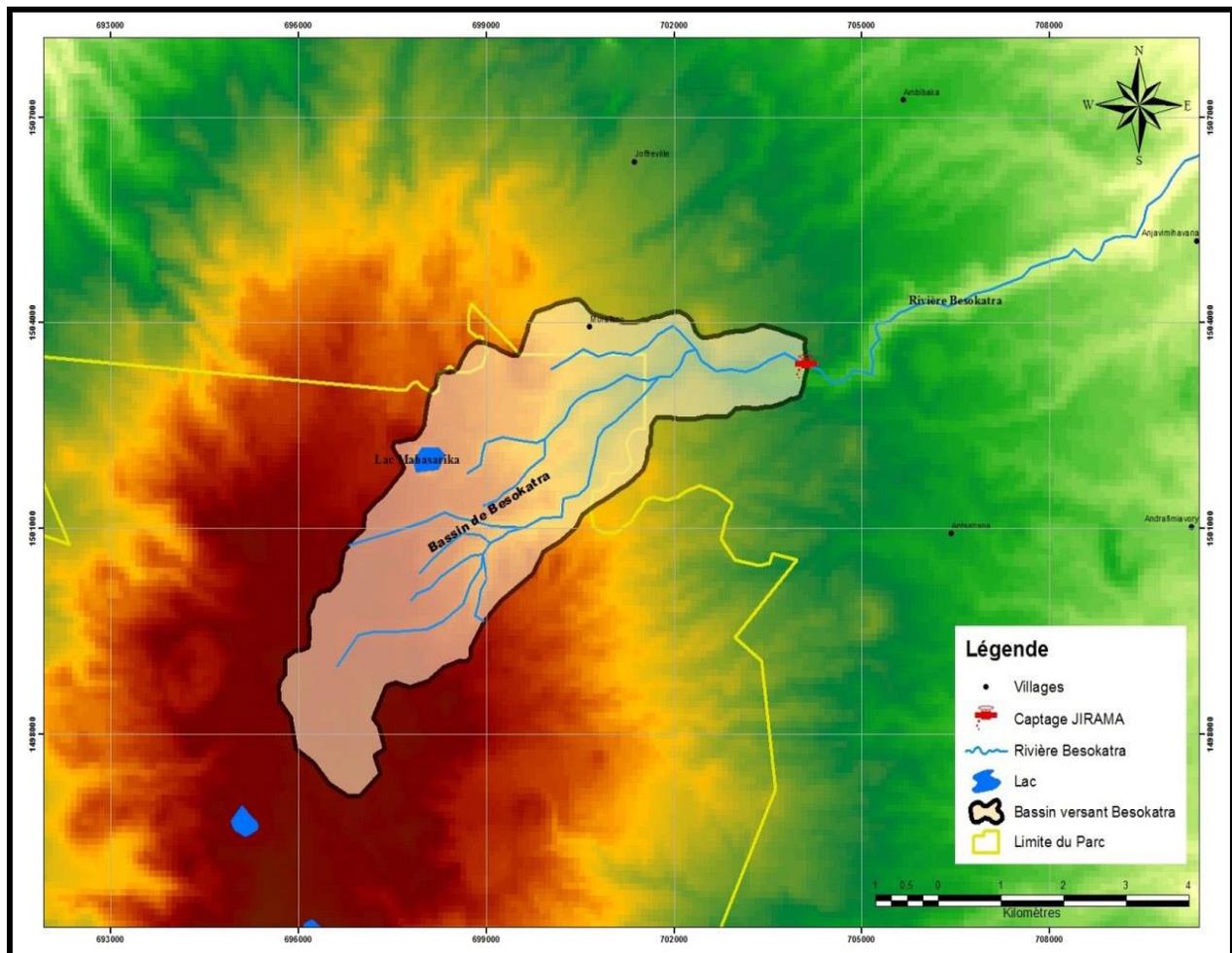


Figure 8: Carte hydrographique de Besokatra. Source : BD 100. (2015)

III. 3.3. Hydrologie

La région présente une hydrographie chevelue. Le régime hydrologique est particulier et est classifié comme étant le régime hydrologique de l'extrême nord et de la Montagne d'Ambre. De nombreux cours d'eau prennent leurs sources dans ce massif qui est qualifié localement, à juste titre, de réservoir d'eau d'Antsiranana. Le tableau 6 résume les principales caractéristiques du régime hydrologique.

Tableau 6 : Caractéristiques hydrologiques de la Montagne d'Ambre. Source : Chaperon et al. (1993)

Climat	P ann (mm) [1]	H ann (mm) [2]	DE (mm) [3]	Ke (Ve) [4]	Débits de Crue médian (l/s/km ²)	Débit d'étiage (l/s/km ²)	Irrégularité Inter-mensuelle (mm)
per humide	1500 à 3300	6 à 700	1500 à 1900	25 à 30	100 à 300	5 à 6	8 à 20

[1] - la pluviométrie annuelle en mm

[2] - la lame d'eau écoulée en mm

[3] – le déficit d'écoulement en mm

[4] - le coefficient d'écoulement en %

III. 4. CADRE GEOLOGIQUE

Les géologues par leurs formations et la finalité de recherches qu'ils avaient entrepris, se sont intéressés avant tout à l'origine et à la stratigraphie des roches constituant le sous – sol malgache. A Madagascar se distingue :

- Le socle cristallin qui est représenté par des formations métamorphiques d'âge précambrien. Il affleure sur les deux tiers orientaux de l'île soit environ 40.000 km².
- La couverture sédimentaire d'âge phanérozoïque. Elle est très peu déformée et non métamorphisée.

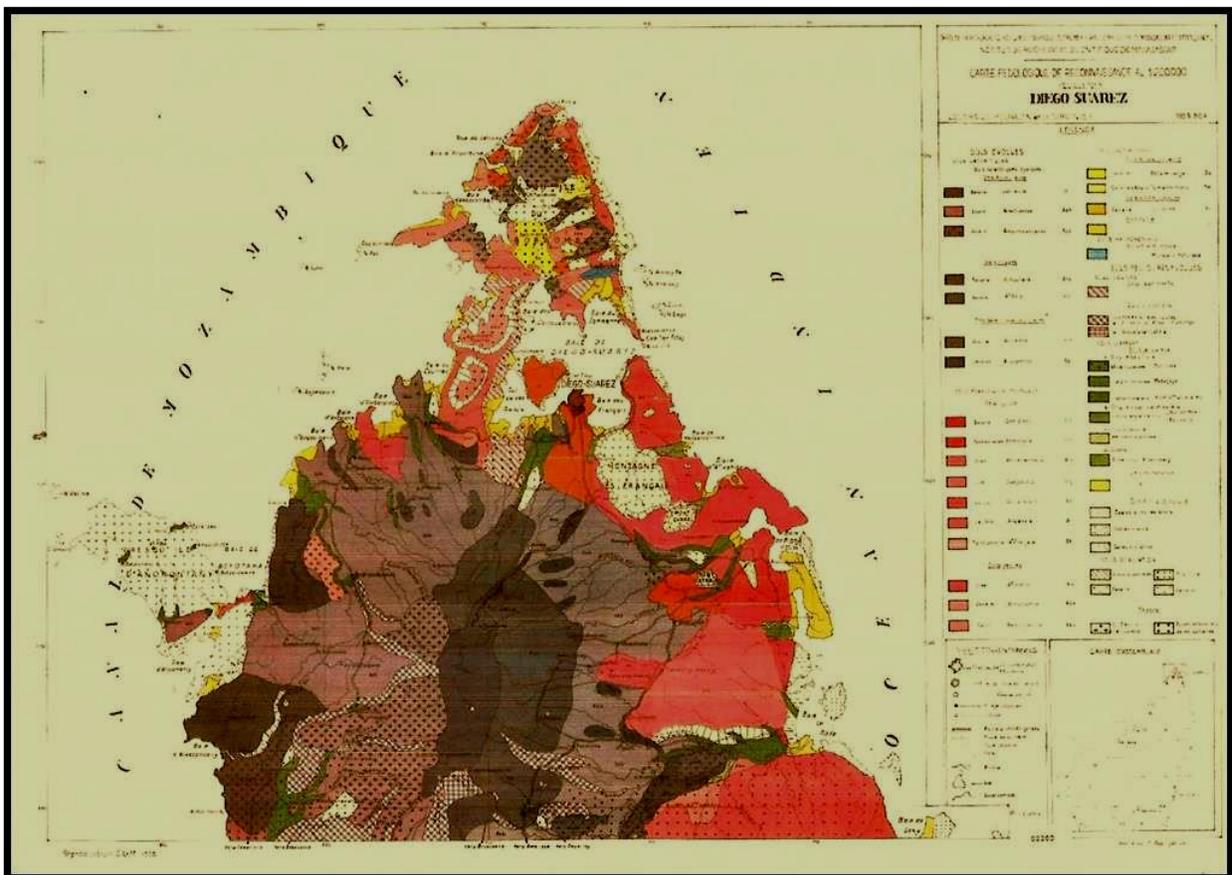
Cependant, lors du rifting Crétacé qui a provoqué l'instabilité du socle, transgressions et régressions marines se succèdent formant alors une alternance de dépôts continentaux et marins. Par ailleurs, c'est lors de ce rifting que se sont mis en place de larges épanchements basaltiques.

La fin du Tertiaire et le Quaternaire ont été marqués par une très importante activité volcanique qui a mis en place, par exemple, la montagne d'Ambre dans le Nord, objet de notre étude.

La montagne d'Ambre culmine à 1475m, les dernières éruptions volcaniques datant du Néogène et du Quaternaire, est recouverte par un basalte fissuré très perméable. La composition minéralogiquement de ces formations est essentiellement représentée par des éléments ferromagnésiens : amphiboles, pyroxènes, etc. Dans le sol (figure 9) se retrouvent deux types d'éléments :

1. des tufs basaltiques ;
2. des basaltes (roches basiques) : des sols ferralitiques typiquement rouge (les altérites).

Les sols qui en dérivent sont légers, spongieux avec des éléments grossiers et perméables. Ils sont riches en potassium (K), azote (N), acide phosphorique (H_3PO_4) et pauvres en calcaire ($CaCO_3$).



La photo 1 représente un exemple de roches basaltiques localisées à plus de 30 km en direction du sud, vers la région de l'Ankarana.



Photo 1 : Basalte trouvé en chemin vers le Sud (Ankarana)

III. 5. SITUATION DE LA RIVIERE BESOKATRA

III. 5.1. Historique

Depuis 1925, la ville d'Antsiranana a été dotée d'une alimentation en eau, qui, initialement, exploitait l'eau des barrages d'Ambodimanga. Le traitement s'est fait à la station du PK7, dont les premiers éléments, joints au réservoir en maçonnerie de moellons de 2.500m³, implanté en centre-ville, datent de cette époque.

Par contre, la Montagne d'Ambre est un ancien volcan, dont les altitudes supérieures sont peuplées d'une forêt dense humide sempervirente isolée d'autres formations végétales homologues par un piedmont de forêt dense sèche. Malgré son statut d'aire protégée depuis plus de 50 ans, depuis les années 60, les ressources d'Ambodimanga ne couvrent plus la demande de population, la production a été faite à partir du barrage sur la rivière Besokatra, équipé d'un premier ouvrage de prise. L'eau brute est toujours acheminée vers la station de traitement du PK7, par une ligne d'adduction en fonte Express en DN400/300/250. Plus tard, en 1989, une deuxième prise et une

deuxième conduite d'adduction ont été construites, sur la Besokatra. Les deux conduites d'adduction mesurent chacune, un peu plus de 25 kilomètres (Source JIRAMA).

La réhabilitation récente du barrage de Besokatra, notamment la construction des passes batardables, est sensé relever la charge au-dessus des prises, et augmenter ainsi le débit entonné. Il semblerait cependant que cela n'ait pas eu l'effet attendu, et les raisons en sont vraisemblablement, le mauvais état, l'inadaptation ou encore l'absence de ventouses sur les conduites d'eau brute. Par ailleurs, la proportion du surplus escompté, qui arrive tout de même à la station de traitement, est soit distribué sans traitement, soit évacué, puisque la capacité de traitement de la station est dépassée.

Mais relativement à la demande à l'horizon du projet, la méconnaissance de l'évolution des débits de la Besokatra, résultant de la probable multiplicité des utilisations qui en sont faites en amont, fait peser de grandes incertitudes sur la pérennité du niveau actuel des apports. Le développement d'activités à l'amont du barrage, conduira vers le tarissement et l'assèchement de la ressource. Et la réalité des changements climatiques, n'atténue pas ces menaces.

III. 5.2. Captage de BESOKATRA

Le barrage de captage est un barrage en béton construit en 1961 dont la hauteur est de 1,45m (cote de la crête : 520,40m). Ce barrage comporte 2 prises d'eau, l'une sur la rive gauche (construite en 1961 en même temps que le barrage) et l'autre sur la rive droite (construite en 1989-1990, photo 2). Le site de captage se situe à 49,23057°E (longitude) et -12,52282°S (latitude).

Le captage de Besokatra a fait l'objet de deux (2) interventions, depuis sa construction :

- une première fois, lors de la création de la prise en rive droite en 1989 ;
- une deuxième fois, pour le rehaussement du seuil du barrage lors de la construction de passes batardables de 40 cm de hauteur, en 2014.



Photo 2 : Barrage JIRAMA : rehaussement du seuil du barrage

Actuellement, divers dispositifs visant à améliorer le fonctionnement de l'ensemble ont été mis en place :

- une passerelle métallique a été construite pour passer d'une rive à l'autre, même en période de crue (photo II en annexe).
- les deux ouvrages de prise ont été munis de grilles, pour les protéger contre les débris solides charriés en période de pluies (photo I en annexe).
- un seuil fonctionnant comme piège à sable a été construit à 50 mètres en amont du barrage.
- pour le suivi de la variation des apports du cours d'eau, deux échelles limnimétriques ont été implantées sur la rive gauche, en amont du barrage. Une station pluviométrique a également été installée à proximité du logement des agents JIRAMA. Ces stations sont observées par les barragistes de la JIRAMA, une fois par jour, en temps normal.



Photo 3 : Limnimètres installés en rive gauche

III. 5.3. Transfert de l'eau brute

L'eau en provenance du barrage de Besokatra est conduite vers la station de traitement PK7 par deux conduites d'adduction. La conduite dite "ancienne" a été posée en 1961 et est constituée de trois tronçons de diamètres 400, 300 et 250mm. Elle ne permet d'alimenter que la seule conduite qui lui est issue.

La conduite dite "nouvelle" a été posée en 1989-1990 et elle est faite de deux tronçons de diamètres 400 et 300mm. Elle permet d'alimenter de façon indépendante les deux conduites, est équipée de quatre vannes réductrices de pression.

Tableau 7 : Caractéristique des conduites d'Adduction

Type	Diamètre en mm	Longueur en m
Fonte (1961) : conduite ancienne	400	3.285
	300	9.931
	250	11.981
Fonte à joint automatique (1989-1990)	400	3.182
	300	22.565

III. 5.4. Caractéristique des infrastructures

III. 5.4.1. Station de traitement (physico-chimique)

La station de traitement PK7 (12°20'05.07"S - 49°17'50.20"E) abrite toutes les infrastructures indispensables permettant de traiter l'eau brute et permettre d'envoyer dans le réseau de distribution une eau potable répondant aux normes. Ainsi, on y trouve principalement :

- quatre (04) décanteurs statiques horizontaux, comportant chacun deux compartiments dans lesquels s'effectuent la coagulation, la floculation et la décantation
- huit (08) filtres monocouches à sable dans lesquels s'effectue la filtration



Photo 4 : Bassins de décantation



Photo 5 : Filtres à sable

- une (01) bache de reprise de 200 m³ dans laquelle l'eau décantée et filtrée est désinfectée et neutralisée (photo 6).

La capacité de production à l'issue de cette chaîne de traitement physico-chimique est de l'ordre de 745 m³/h (soit 17 880 m³/j).



Photo 6 : Bâche de reprise de 200 m³

III. 5.4.2. Réservoirs

Les réserves en eau potable de la ville d'Antsiranana sont ensuite stockées dans deux réservoirs de tête situés au PK7 et dans un réservoir d'équilibre situé en centre-ville (Lally Tolendhale).

Tableau 8 : Caractéristiques des réservoirs Source : JIRAMA (2016)

Emplacement	Volume (m ³)	Côte du radier (m)	Côte de trop plein (m)	Année de mise en service
PK7	2000	85,73	91,2	1970
PK7	1000	85,80	90,80	1958
Lally Tolendhale	2500	40,3	43,3	1925

III. 5.4.3. Réseau de distribution

III. 5.4.3.1. Description

D'une longueur totale d'environ 100 km, le réseau de distribution de la ville d'Antsiranana est constitué par des conduites en fonte, en PVC et en acier galvanisé dont les diamètres varient de 50 à 400mm. C'est un réseau relativement vétuste puisque certaines conduites datent de 1925 et même les plus récentes datent déjà de 2006.

Tableau 9 : Caractéristiques des conduites du réseau de distribution. Source : JIRAMA (2016)

Diamètre nominale (m)	Longueur (m)		
	Fonte	PVC	Galvanisée
50		9013	1405
60	6743	13434	
75		4737	
80	10680		
90	10680		
100	11023	1100	
150	7443		
200	7718		
225	407		
250	2304		
300	11749		
400	2164		
Totaux	70911	28284	1405

La plupart des conduites de ce réseau ont déjà dépassé leur durée de vie normale ce qui rend les interventions de réparation grandiose. Ainsi, lors des vidanges, quand les tuyaux sont mis en dépression, les contraintes mécaniques internes causée par des affaissements aboutissent à des désemboîtements des joints, des fêlures, voire des cassures d'où l'apparition de fuites en divers points du réseau et le long du réseau.

III. 6. PROBLEME DES RESSOURCES EN EAU DANS LA MONTAGNE D'AMBRE

III. 6.1. Dégradation de l'environnement de la montagne d'Ambre

Actuellement, la Montagne d'Ambre au niveau de la forêt dense humide sempervirente connaît une perte de forêt en moyenne de 2 ha par an.

Trois sortes de pressions détruisent peu à peu l'environnement régional :

- **feux de brousse ;**
- **coupe de bois et/ ou défrichage : c'est-à-dire la** culture itinérante sur brûlis ou tavy, la construction (des meubles, des maisons en case, des ponts,...), la coupe illicite (sans autorisation), la domination des cultures de subsistance et du « Khat ou *Catha edulis* » et surtout la méconnaissance de la valeur environnementale de l'Aire Protégée.
- **Energie :** exploitation des charbons non réglementaires, non utilisation des bois à énergie (par exemple : acacia,...) et faible taux de reboisement.

Ces trois pressions avaient beaucoup de conséquences sur les ressources en eau par exemples :

- tarissement des différentes sources d'eau (eaux souterraines et eaux de surface), disparition des espèces végétales et animales endémiques ;
- dégradation des sols (ensablement, sol non fertile, existence des mauvaises herbes dans les rizicultures) ;
- érosion hydrique et mécanique sur les champs de culture et les versants ;
- irrégularité des précipitations annuelles ;
- perturbations des régimes hydrologiques ;
- augmentation de la chaleur et de la sécheresse (perturbation des calendriers cultureux).

III. 6.2. Problématique du bassin versant de Besokatra

La question de l'eau devient un sujet très préoccupant depuis toujours, car elle est liée à l'évolution de tous les besoins humains. La ressource en eau de la rivière de Besokatra, à Joffre Ville, approvisionne simultanément la ville d'Antsiranana en eau potable et les populations riveraines pour leur Agriculture. Ces diverses utilisations ont un rapport direct avec la disponibilité de l'eau et aussi sur le développement socio-économique du milieu c'est-à-dire, suite à l'évolution des agglomérations environnantes, les besoins en eau s'accroissent au fil du temps et jusqu'à l'implantation des nombreuses infrastructures traditionnelles imprévues locales (barrages)

partant de la source mère en amont. Ainsi, les conflits d'usage de cette ressource eau contextualise le milieu social de la population de proximité et affectent le développement en général de la zone où les 5 Communes (Antsiranana ville, Joffre Ville, Antanamitarana, Mahavanona et Sakaramy) qui en tirent en même temps, jusqu'à présent, leurs besoins sur la réserve en eau de la Montagne d'Ambre via la rivière de Besokatra. Mais la question qui se pose : « Quels sont les facteurs qui expliquent pourquoi l'écosystème aquatique de Besokatra se dégrade et n'arrive pas à subvenir aux besoins? »

Face aux problématiques des ressources en eau cités en dessus, l'étude profonde de ces problèmes est une composante très utile pour la gestion et la protection des eaux en utilisant la méthodologie d'approches présentée dans la partie suivante.

Partie II

MATERIELS ET METHODES

I. METHODOLOGIE D'APPROCHES

La méthodologie mise en œuvre comprend trois points principaux. Premièrement, une étude bibliographique a été faite avant la descente sur terrain. Ce qui permet d'orienter la recherche. Deuxièmement, des travaux de terrain ont été effectués au sein de cette forêt tropicale humide, pour y réaliser un inventaire de différents points d'eau et de la prospection géologique, les mesures faites ont été déterminés à Antananarivo sauf la géologie. La démarche suivie pour réaliser ce mémoire est résumée sur la figure 10. Enfin, troisièmement, une analyse des données a été effectuée à l'aide d'un logiciel SIG pour répondre aux hypothèses de cette recherche et présenter la ressource en eau de la Montagne d'Ambre. Ces analyses ont par la suite permis la rédaction de ce travail mais également d'articles scientifiques.

1. L'étude hydrogéologique

Elle a été réalisée par l'équipe de WAVES à Antananarivo plus précisément l'équipe du Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et d'Hygiène central et du Ministère de la Météorologie d'Antananarivo afin de procéder à la détermination des paramètres physiques du réservoir, ou les mesures des niveaux piézométriques pour but de déduire les caractéristiques hydrodynamiques.

2. La géophysique

Une méthode de prospection géophysique pour la recherche d'eau a été effectuée dans le bassin versant du Besokatra durant la mission de l'équipe WAVES. Le but est de déterminer les couches résistantes en profondeur qui pourraient constituer des réservoirs d'eau et d'estimer le niveau imperméable de la structure hydrogéologique de la zone d'étude.

Cette méthode de prospection est basée sur la réalisation du panneau électrique, et du sondage électrique. Le panneau permet de suivre l'investigation simultanée du sous-sol, suivant la verticale et l'horizontale dans la direction du profil de mesure. Le principe d'acquisition des données consiste à injecter le courant électrique à travers un grand nombre d'électrodes à distance périodique, tout le long d'un profil à partir de différentes combinaisons de quatre électrodes spécifiques (A, B, M et N) selon le dispositif adéquat (Wenner pour le présent cas). Tandis que le sondage électrique sert à déterminer et à étudier la succession et la structure du sous – sol une station à partir du paramètre physique et de mesures de résistivité apparente de chaque formation (couche lithologique) par

injection du courant à tout le 4 m à l'aide d'une électrode, puis mesurer la différence de potentielle par l'intermédiaire d'électrode potentiel.

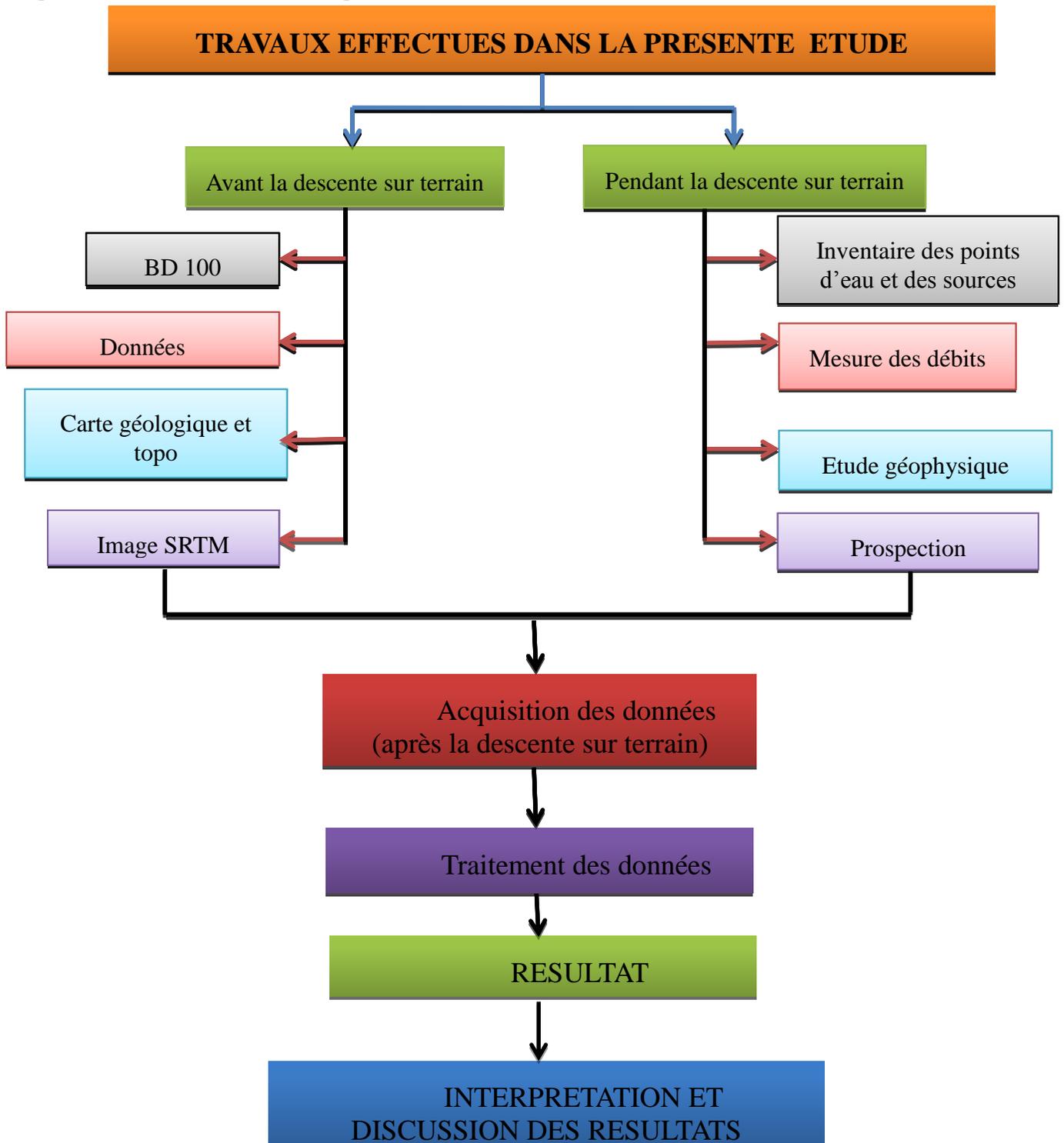


Figure 10 : Organigramme du travail de la présente étude

On note que trois stations de mesure (panneaux) ont été effectuées lors de la descente sur terrain de l'équipe WAVES. Le sondage consiste aussi à mener une investigation verticale, sa différence avec le panneau est la profondeur d'investigation qui arrive jusqu'à l'ordre de 60 mètres.

3. Le SIG

Dans cette méthodologie adoptée, le SIG est un outil utilisé comme aide à cartographier la zone afin de traiter les données pour prendre une décision.

3.1 Présentation du logiciel

Le logiciel ArcGIS 10.0 est une suite intégrée d'applications SIG avancées. ArcGIS Desktop peut se décomposer en 3 versions aux fonctionnalités croissantes, notamment, ArcView, ArcEditor et ArcInfo. Chaque version d'ArcGIS Desktop comprend trois suites d'applications intégrées :

- **Arcmap** : utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes ;

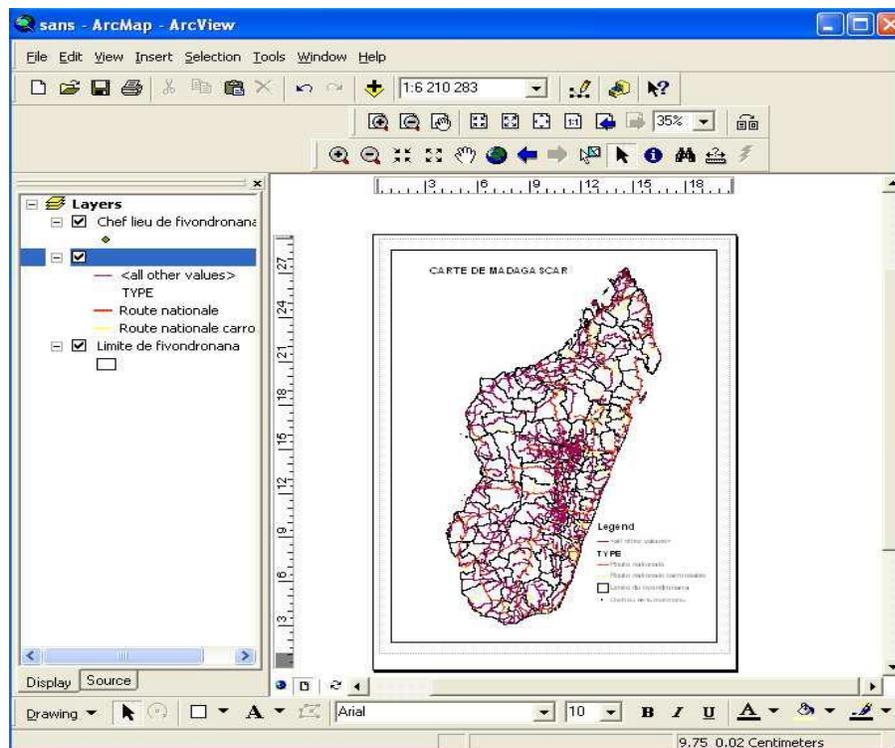


Figure 11 : Présentation de l'Arcmap

- **Arcatalog** : une application qui permet de gérer les stocks de données spatiales et la conception des bases de données ainsi que d'enregistrer et de gérer les métadonnées ;

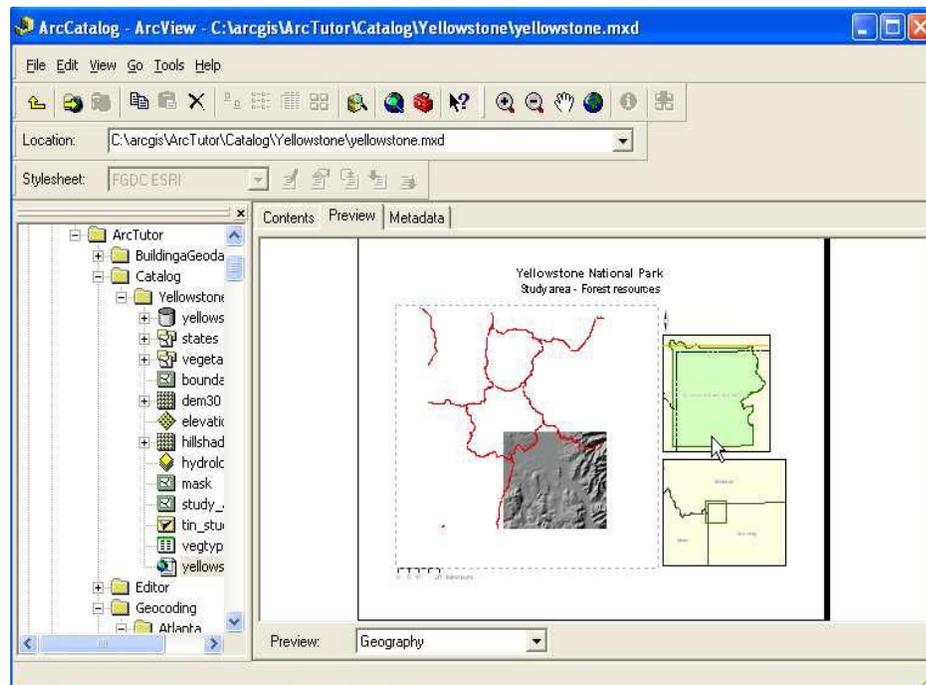


Figure 12 : Présentation de l'Arcatalog

- **Arctoolbox** : utilisé pour la conversion des données et le géotraitement).

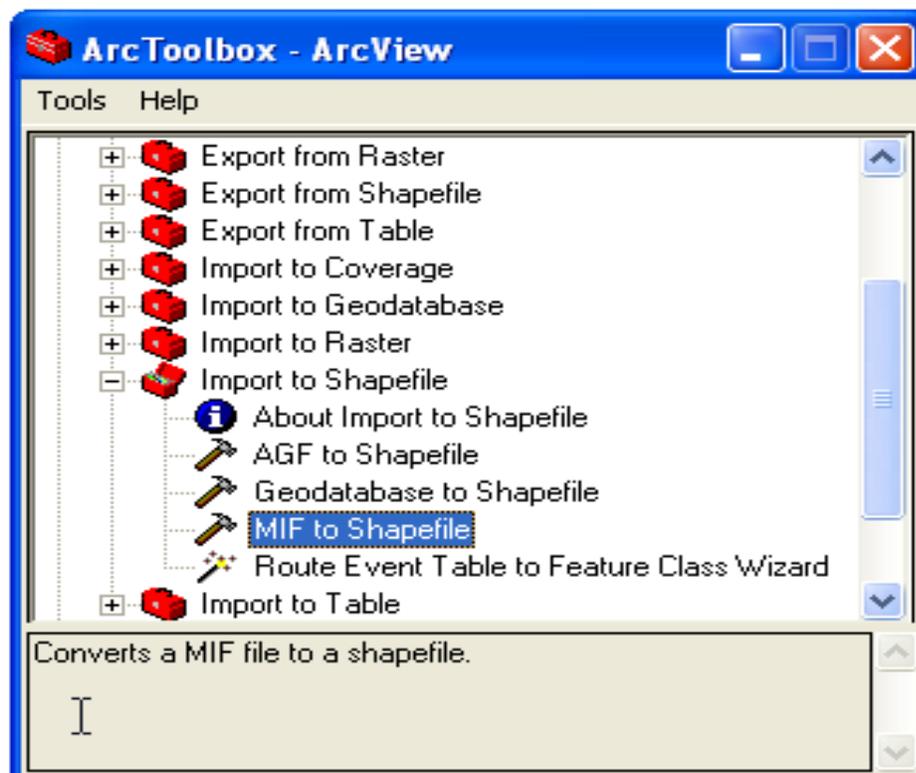


Figure 13 : Arctoolbox

3.2 Traitement des cartes

Avec l'ArcGIS, on a permis de superposer différentes cartes topographiques, MNT et géologique. Les points GPS des récoltes antérieures à notre étude ont également été ajoutés.

3.2.1 Technique de géoréférencement

Pour transformer une image raster en carte, il fallait la géoréférencier ou caler afin qu'on puisse faire la vectorisation. Sur ce, il est donc nécessaire de scanner la carte sous forme jpeg, ouvrir l'image dans Arcmap (Ajouter données) puis entrer les points de calage en cliquant sur l'icône ajouter les points de contrôle dans la barre de menu « Géoreferencement ». Cliquer sur un point identifiable dans la carte, ensuite cliquer à droite juste à côté, entrer les points X et Y.

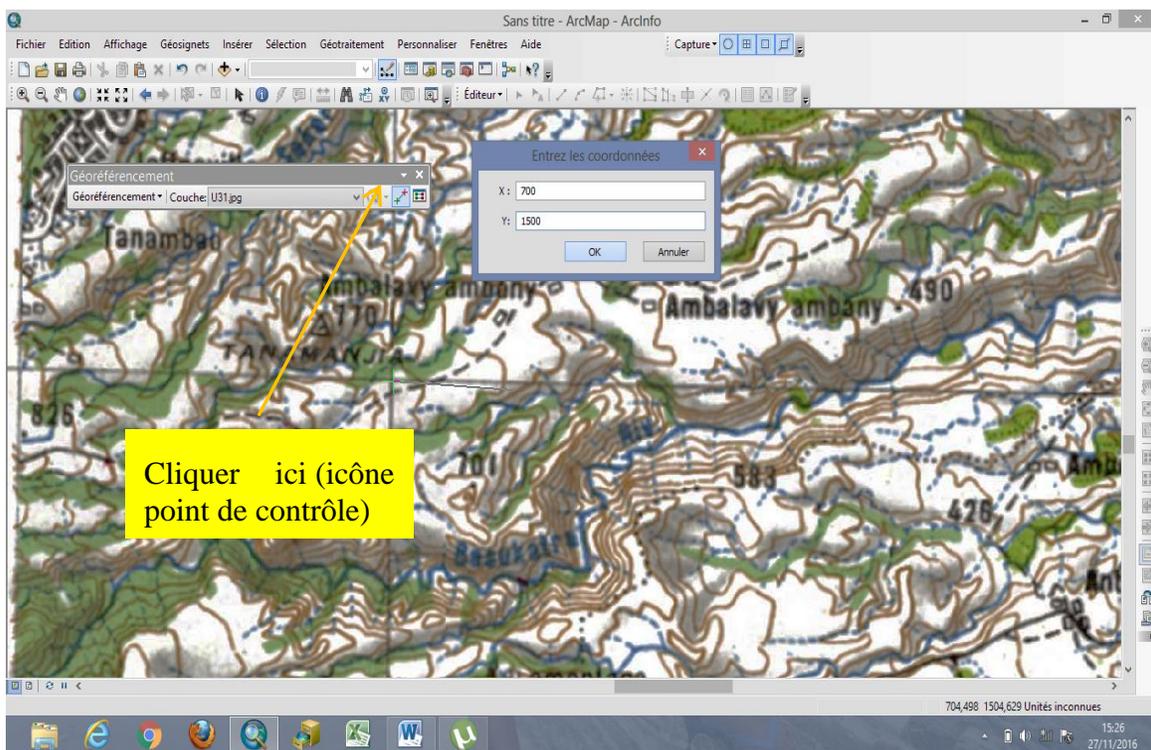


Figure 14 : Méthode de géoréférencement

Pour sauvegarder le géoreferencement : cliquer sur « Géoréférencement », ensuite cliquer sur « Mettre à jour le géoréférencement ».

3.2.2 Technique de vectorisation

Création d'un shapefile (fichier : « .shp ») sous ArcCatalog : ouvrir ArcCatalog / Cliquez droit dans la fenêtre / Nouveau / Fichier de forme / Saisir le nom et la forme du fichier (Point, Ligne, Polygone)/ Ok.

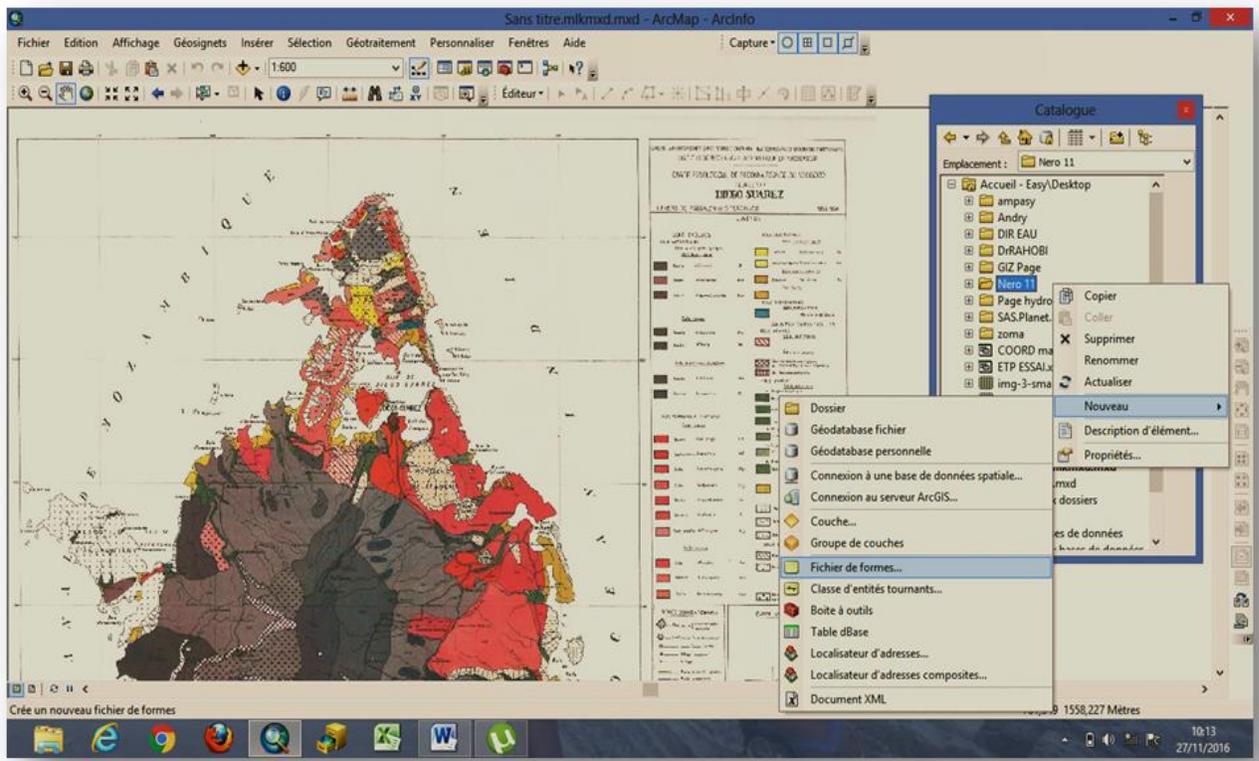


Figure 15 : Technique de vectorisation

Le nouveau fichier apparaît dans la table de matière, après Aller dans le menu « Editeur » puis « Ouvrir une mise à jour », faire la numérisation.

3.2.3 Intégration des points GPS dans le SIG

- Mettre les données sous format EXCEL ;
- Mettre les coordonnées en format degré décimal (ex : 48,3264, -13,2467) ;
- Affecter un signe (-) à la latitude, vu que Madagascar se trouve dans l'hémisphère sud ;
- Assurer qu'il n'y pas de cellule fusionnée ;

Ouvrir dans Arcmap le fichier EXCEL (Ajouter données) : cliquer sur « Fichier » / « Ajouter des données » / « Ajouter des données XY ».

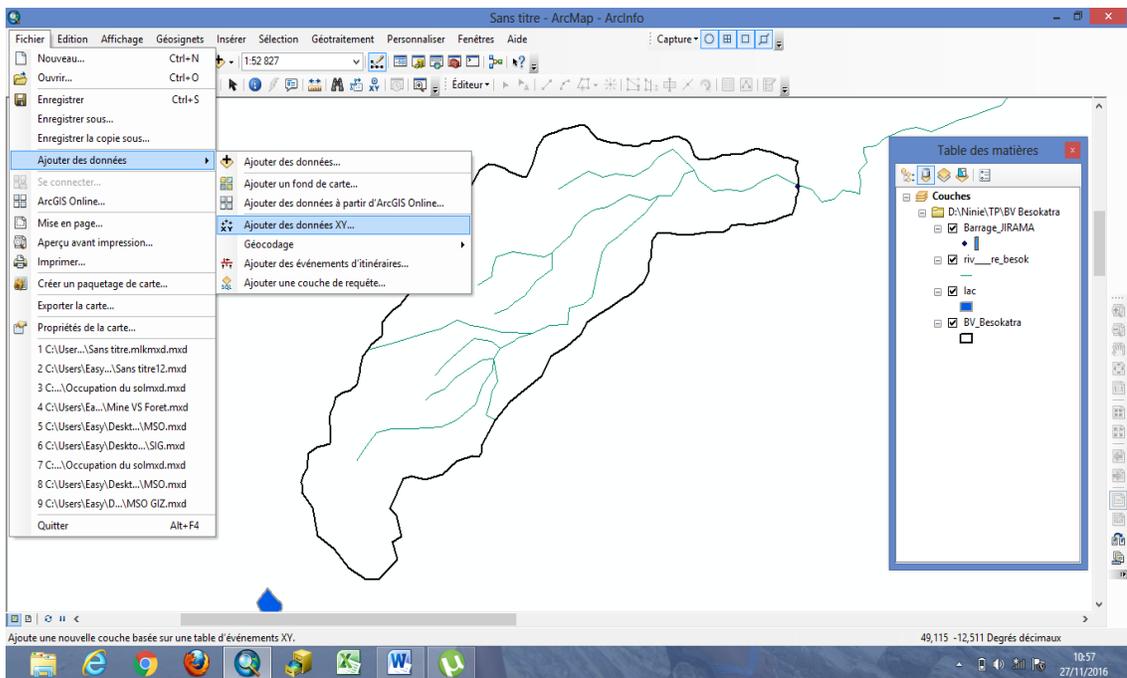


Figure 16 : Mode d'intégration des coordonnées GPS dans le SIG

Entrer dans « **champ X** » l'attribut contenant la longitude et dans le « **champ y** » celui qui contient la latitude.

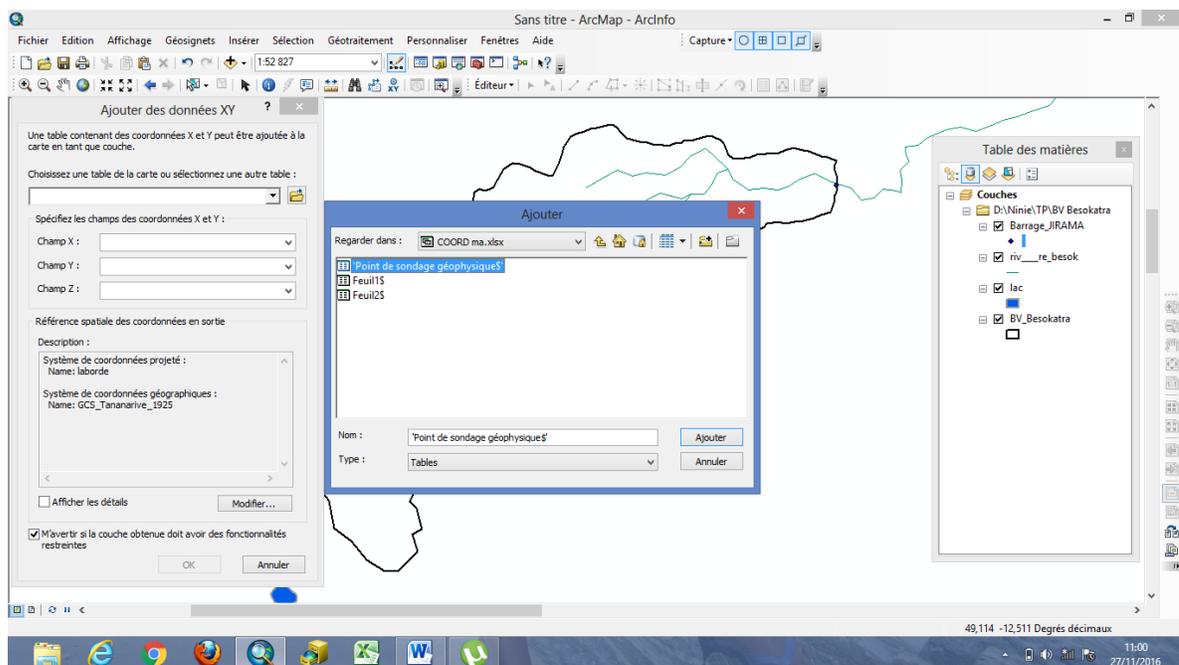


Figure 17 : Remplissage des champs X, Y et Z

Après convertir le résultat en shapefile et changer le système de coordonnées suivant la carte utilisée.

4. Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite

4.1. Pourquoi utiliser la méthode de Thornthwaite ?

Les mesures directes de l'évapotranspiration (sur lysimètre) sont rares à Madagascar. C'est pourquoi les naturalistes ont cherché dans l'arsenal des formules climatiques, celles qui, comparativement aux résultats des mesures, donnaient les meilleures approximations. RIQUIER (1963) a estimé (après avoir testé neuf formules) que les meilleurs résultats étaient obtenus avec les formules de PENMAN, BUSINGER, WALKER, TURC et PRESCOTT. Cependant les calculs impliquent que soient disponibles un certain nombre de paramètres (insolation, albédo, radiation vraie, etc.) mesurés dans un nombre relativement rare de stations climatologiques. N'exigeant que des données de température (mesurées sur un grand nombre de station).

Du fait de cette insuffisance de données le calcul de l'évapotranspiration par la formule de Thornthwaite est adopté dans r plusieurs ouvrage et par de nombreuses organes.

Dans le cas des hautes terres centrales cette méthode peut s'adapter à la réalité physique en appliquant les corrections adéquates.

4.2. Principe du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique se traduit comme suit : $P=E+R+I+/- \Delta s$ en mm/an.

P : précipitation, E : évapotranspiration, I : Infiltration, R : ruissellement, Δs : la variation de stock (voir définition en annexe).

4.3. Méthode de calcul

Le calcul s'effectue sur un tableau Excel.

Il faut disposer de valeurs de températures mensuelles et de pluviométries mensuelles, qu'il faut reporter sur le tableau par mois de janvier à décembre.

Puis il faut effectuer les calculs selon les étapes décrites ci-dessous.

- Calculer l'évapotranspiration potentielle non corrigée

Thornthwaite a donné une formule pour estimer l'évapotranspiration potentielle mensuelle pour un mois fictif de 30 jours et pour une durée théorique d'ensoleillement de 12 heures sur 24: C'est ce qu'on appelle l'évapotranspiration potentielle non corrigée.

La formule est :

$$ETP_{nc} = C \cdot t^a$$

On a :

- ❖ ETP_{nc} : évapotranspiration potentielle non corrigée en centimètres par mois.

Dans le tableau de calcul en Excel, il faut avoir ETP_{nc} en mm/jour ; il faut donc effectuer l'opération suivante : Diviser la valeur obtenue par la formule par 30 et multiplier par 10.

- ❖ C : est le coefficient de correction. Cette valeur est obtenue en utilisant la durée d'ensoleillement mensuelle qui est différent selon la latitude.

Elle est égale au Nombre de jour fictif (30 jours) divisé par la durée fictive d'ensoleillement (12 heures) que l'on multiplie par la durée réelle d'ensoleillement du mois (qui sont les chiffres pour la latitude sud). Les valeurs ont été déjà calculées et sont égales à :

Tableau 10 : Coefficient de correction

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Coefficient de correction	32,8	28,9	31,4	29,7	30,6	29,8	30,5	30,8	30,1	31,8	31,6	37,8

Il faut simplement reprendre ces chiffres dans le tableau de calculs.

- ❖ **t** : température moyenne mensuelle en °C,
- ❖ **a** : le coefficient caractérisant la zone qui est fonction de la température et est obtenu par la formule :

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0,5$$

- **I** est l'indice thermique annuel égal à la somme des *i* variant du 1^{er} mois jusqu'au 12^{ème} mois :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

- i est l'indice thermique mensuel et obtenu par la formule suivante :

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

➤ **Calculer l'évapotranspiration potentielle réelle**

Les valeurs sont obtenues par la relation :

$$ETP = ETP_{nc} \times C$$

➤ **Introduire les valeurs de Précipitation P**

➤ **Calculer P – ETP**

➤ **Estimer les déficits cumulés en utilisant les démarches suivantes :**

Regarder les valeurs de de P-ETP, deux cas peuvent se présenter : P-ETP >0 et P-ETP < 0

Donc le déficit cumulé :

- Le premier déficit sera au premier P-ETP < 0
- Le second sera = au déficit précédent + P-ETP du mois
- **Déterminer les stocks**
- Si P-ETP >0 le stock S= 100
- Si P-ETP < 0 le stock est à lire sur une table en fonction du déficit cumulé.

Il faut utiliser une table de valeur appelée « Stock en fonction du déficit cumulé » (fichier « stock » voir tableau n°3 en annexe I).

➤ **Déterminer la variation des stocks**

$$\Delta S = \text{stock du mois} - \text{stock précédent}$$

➤ **Déterminer ETR**

- Si $\Delta S \leq 0$ et P-ETP >0 → ETR = ETP
- Si $\Delta S < 0$ et P-ETP < 0 → ETR = P + ΔS

Après une série de P-ETP < 0 le déficit cumulé est maximum.

Quand P-ETP.>0 le surplus va d'abord ramener le stock à 100 mm, c'est pourquoi on a d'abord P-ETP + dernier stock.

Ensuite si P-ETP est suffisant il y a remplissage du stock.

(P-ETP) - x = 100 • x (x vient du stock précédent).

➤ **Calculer le surplus (ruissellement ou excédent)**

Le surplus (ruissellement) est égal à : Surplus = Stock précédent – x

$$Q = \frac{\text{Surplus multiplier par surface du bassin versant}}{\text{Temps}} = m * m^2/\text{seconde}$$

$$Q = \text{Surplus} * 103 * S * 106 / N (\text{jours}) * 24 * 3600$$

II. DONNEES UTILISEES

Les données utilisées dans cette étude sont essentiellement les données bibliographiques, BD 100, les données cartographiques, MNT et les données du terrain.

▪ **Les données bibliographiques :**

L'étude bibliographique a été considérée comme primordiale afin de lister les documents et les matériels scientifiques jugés comme pertinents pour cette présent mémoire puis d'identifier les activités à entreprendre sur terrain en tenant compte des circonstances et contextes locales.

▪ **BD 100 :**

Ce sont des données référentielles géographiques nationales (données numériques) à l'échelle 1/100000 produites par la FTM. La BD 100 renferme deux cartes scannées de la région (U31 et V31) qui vont servir de supports supplémentaires pour la conception du SIG.

La réalisation du tracé des réseaux hydrographiques, la délimitation de la végétation, ainsi que la localisation des villages et des subdivisions administratives, ont été possible grâce aux informations tirées de la base de données « BD 100 » de la FTM.

▪ **Les données cartographiques de la FTM et du Service Géologique :**

La numérisation de la carte géologique 1/100 000è et la carte topo 1/100000è de la zone d'étude se sont avérées nécessaire pour une meilleure approche pour l'étude de la délimitation en surface des formations ainsi de la tracé du réseau hydrographique et l'occupation du sol.

- **Le Modèle Numérique du Terrain (MNT ou SRTM 90m) :**

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT ou SRTM 90 m) est une représentation 3D de la surface d'un terrain ou d'une planète, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels les plantes et les bâtiments.

Il est utilisé pour l'extraction des paramètres du terrain, les tracés des profils topographiques, la modélisation de l'écoulement de l'eau ou de la masse du mouvement, les Systèmes d'information géographique (SIG), la cartographie de base, les analyses de terrain en géomorphologie et géographie physique, la rectification géométrique de photographie aérienne ou d'imagerie satellitaire, et la visualisation en 3D.

Le traitement de ces données a fait appel aux divers matériels et traitements suivants :

- **GPS** : ajout des divers points levés sur le terrain ;
- **ArcGIS** ;
- **Les données de terrain** (prospection géologique, sondage électrique (appareil de mesure) et différentes mesures effectuées (moulinet, etc...)) ;
- **Les analyses de l'eau** faites par la JIRAMA.

Les résultats de ces traitements sont présentés dans la partie suivante

Partie III

RESULTATS et INTERPRETATIONS

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre IV : ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES QUANTITATIFS

Etant donnée l'objectif cité en introduction, l'outil informatique permet de planifier la gestion des besoins en eau et la protection dudit bassin, mais avec la connaissance de certains paramètres qui s'avère nécessaire tels que : les paramètres physico-chimiques, l'étude de la demande et d'utilisation de ressources ainsi que le captage, la réserve et la ressource.

Malgré les mesures faites durant les travaux sur terrain, tous les résultats sont rapatriés à Antananarivo là où ils ont traité par les différentes entités du projet WAVES (les différents paramètres physiques et hydrogéologiques) sauf les différentes cartes numérisées et quelques données. C'est-à-dire la plupart des résultats issus de cette présente mémoire feront partie des travaux de recherche du projet WAVES au sein du Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène à Madagascar.

1. Les paramètres physiques et les projections sur l'évolution du climat de Besokatra pour l'année 2020

D'après les analyses des différentes séries des données Météo calculées, nous permettons de résumer la projection sur l'évolution du climat de Besokatra pour l'année 2020.

1.1. Température

Les températures moyennes annuelles enregistrées sont : maximale entre 24°C à 26,4°C, minimale 20,4°C et la température moyenne annuelle journalière est de 23,1°C. A signaler que la température minimale peut atteindre jusqu'à 3°C la nuit au sommet de la montagne d'Ambre. La température maximale est observée au mois de décembre à mars. On constate que les mois les plus chauds correspondent aux mois les plus pluvieux, le mois froid au mois de Juillet.

Les données sont présentées dans le tableau 11 pour la période de 2002-2013.

Tableau 11 : Température moyenne mensuelle Montagne d'Ambre. Source : Direction Régionale de la Météorologie DIANA (2014)

Mois/Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Valeurs normales
Janvier	24,3	24,1	23,7	24,1	24,0	23,9	23,8	24,0	25,3	24,8	24,8	24,8	23,8
Février	21,3	21,0	22,2	24,1	21,2	24,2	23,2	23,7	24,6	23,7	24,1	24,1	23,6
Mars	24,1	24,1	24,0	24,3	24,1	23,7	23,4	24,0	24,7	25,0	25,1	25,1	23,9
Avril	23,2	23,1	22,7	24,3	23,5	23,8	23,6	24,2	24,6	24,4	24,4	24,4	23,9
Mai	23,2	23,4	22,2	23,3	23,6	23,7	23,4	24,4	23,8	23,1	23,1	23,1	23,2
Juin	20,9	21,1	20,4	25,0	22,5	22,8	21,7	22,9	22,8	21,2	21,2	21,2	21,9
Juillet	21,3	21,4	20,8	22,0	21,2	22,2	21,2	21,7	21,5	20,9	20,9	20,9	21,2
Août	21,1	21,3	21,0	20,8	21,7	22,4	21,2	21,2	21,7	20,9	21,2	21,2	21,3
Septembre	20,9	21,5	21,9	21,7	22,2	22,3	23,2	22,3	22,4	21,8	21,8	21,8	22,0
Octobre	26,4	23,0	23,3	22,7	23,4	23,4	23,6	24,3	23,3	22,8	23,1	23,1	23,0
Novembre	23,4	23,6	24,2	24,4	24,5	24,5	23,9	24,8	24,2	23,8	23,8	23,8	24,1
Décembre	24,6	24,0	24,7	23,9	23,6	24,9	23,6	23,9	24,2	24,2	24,4	24,4	24,4
	22,9	22,6	22,6	23,4	22,9	23,5	23,0	23,4	23,6	23,0	23,1	23,1	23,0

En présentant ces résultats au-dessus sous forme des courbes, on constate qu'il y a une variation de température. Ce qui est montré sur la figure 18.

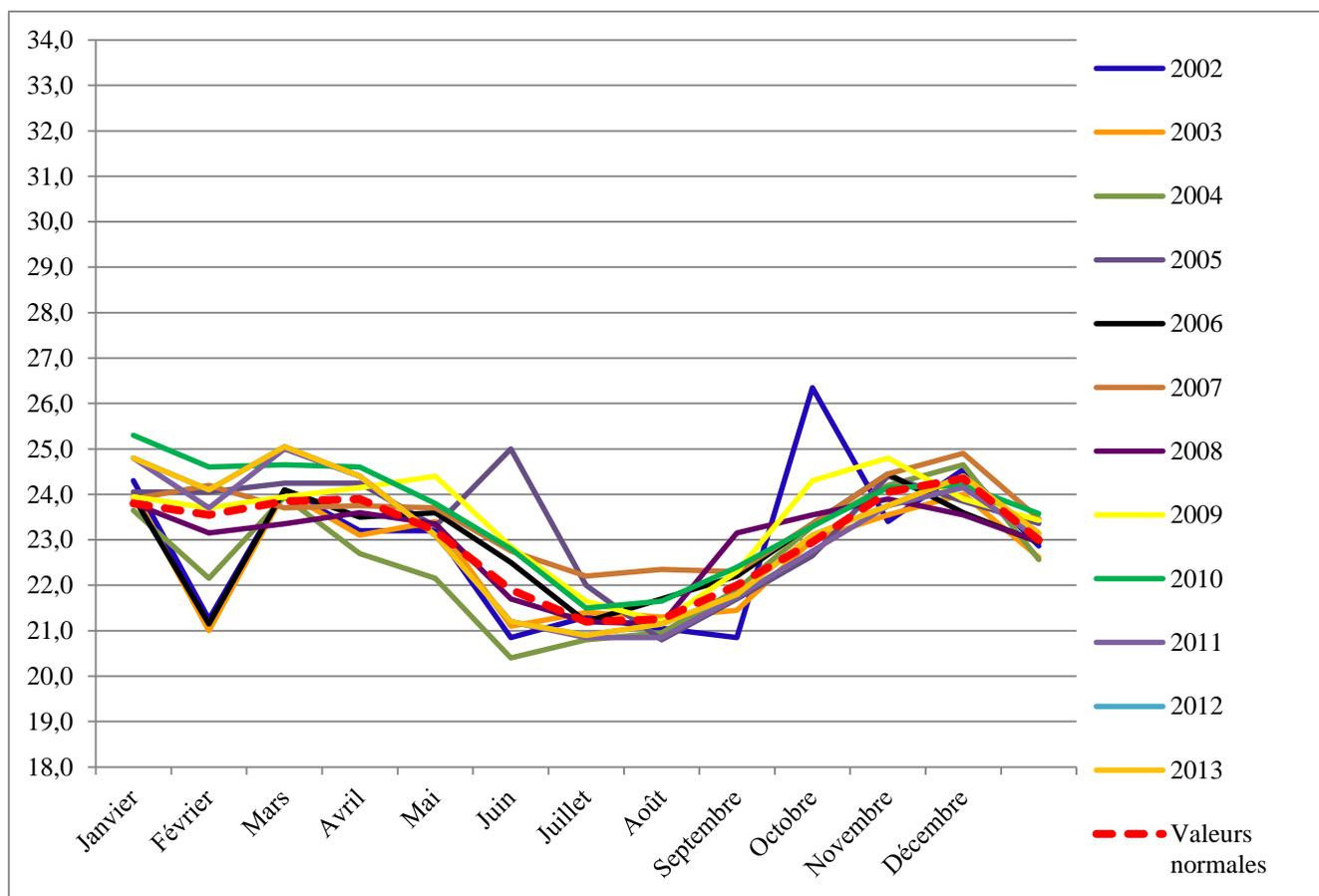


Figure 18 : Comparaison de la température moyenne par rapport à la normale entre 2002 à 2013

1.2. Evolution des températures

Les températures sont dans l'ensemble peu élevées. Les amplitudes diurnes peuvent atteindre 3 à 17°C.

La figure 18 montre l'évolution des températures moyennes mensuelles par rapport à la normale entre la période 2002-2013. En général, elles représentent de faible augmentation de la température de l'air plus de 1,1°C à 1,5°C, mais par rapport à la ville d'Antsiranana et les Districts aux alentours. Les températures sont basses et influencées par les vents océaniques constants de Sud-Est appelés varatraza responsable ou porteur de pluies qui arrosent les versants supérieurs pendant la saison hivernale qui est sèche sur les régions environnantes en contre bas. Ce fait pourrait s'expliquer en grande partie par l'accroissement de l'humidité de la nébulosité et la diminution de la précipitation dans le bassin qui favorise la modération de l'augmentation de la température.

1.3. Précipitation

Les données de précipitations estimées par satellite de 2001 à 2013 pour la montagne d'Ambre ont été analysées. Et ça fait quelques années, les stations météo dans cette zone ne sont pas fonctionnelles mais celle d'Arrachard est fonctionnelle. Le résultat de la précipitation est représenté dans le tableau 12. Les histogrammes de comparaison des quantités de pluie par rapport à la normale montrent les résultats sur la figure 19.

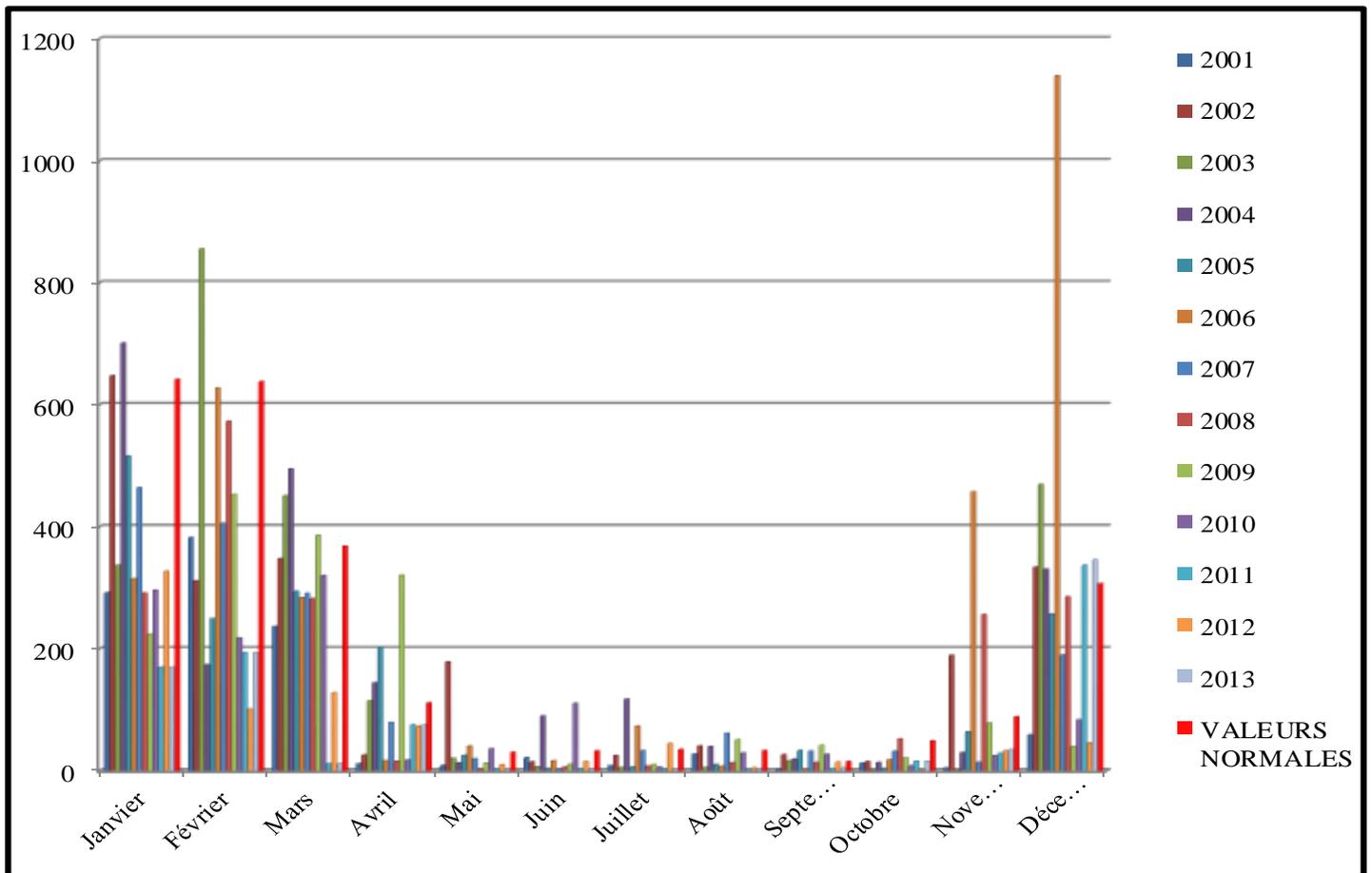


Figure 19 : Comparaison des quantités de pluie entre 2001 au 2013 par rapport à la normale

Tableau 12 : Précipitation mensuelle et annuelle de montagne d'Ambre entre 2001 et 2013. Source : Direction Régionale de la Météorologie DIANA
(2014)

Mois/Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	VALEURS NORMALES
Janvier	291,8	647,6	336,8	701	516	314,8	464,4	291,2	224	296	170	327,2	170	641,3
Février	382,4	311,2	855,2	173,8	249,4	627,2	405,6	572,6	453	217,6	193,6	101	193,6	638,0
Mars	236,4	347,6	450,8	494,8	294,2	283,6	290,8	282,2	385,8	320	11,6	128	11,6	368,0
Avril	11,6	25,6	114,6	144	202,2	16,6	79	15,6	320,6	17,4	75,2	72,6	75	111,2
Mai	8,8	178,4	20,2	13	25,2	40,6	19,6	2,6	12,6	35,8	3	9,8	3	30,2
Juin	21,4	14,6	6,4	89,8	4	16,4	2,6	5,8	10,8	110,4	3	15	3	32,6
Juillet	8,4	24,8	5,4	117,2	6,2	73,2	33	7,8	10,2	6,2	3	44,8	3	35,0
Août	27,2	40,6	5,4	39,8	10,2	7,4	61,4	13,2	50,8	29	3,2	4,8	3,2	32,9
Septembre	2,2	26,4	16,4	19,2	33,2	2	32,2	13,8	41,8	26,8	3,8	14,4	4,8	15,0
Octobre	12,2	15	0,4	13,6	3,8	17,8	32	52	21	8,2	15,6	0	15,6	49,0
Novembre	4,8	189,2	0,2	29,6	63,8	457,2	14	256	78	24,6	28,8	32,6	34,8	88,5
Décembre	58,8	333,6	469,2	330,4	256,8	1139	189,6	285,2	39,6	83,4	337	45,8	346	306,7
P moy/ann	1066	2154,6	2281	2166,2	1665	2995,8	1624,2	1798	1648,2	1175,4	847,8	796	863,6	2348,5

A partir des histogrammes ci-dessus (figure 19), on peut déduire la tendance de la précipitation annuelle.

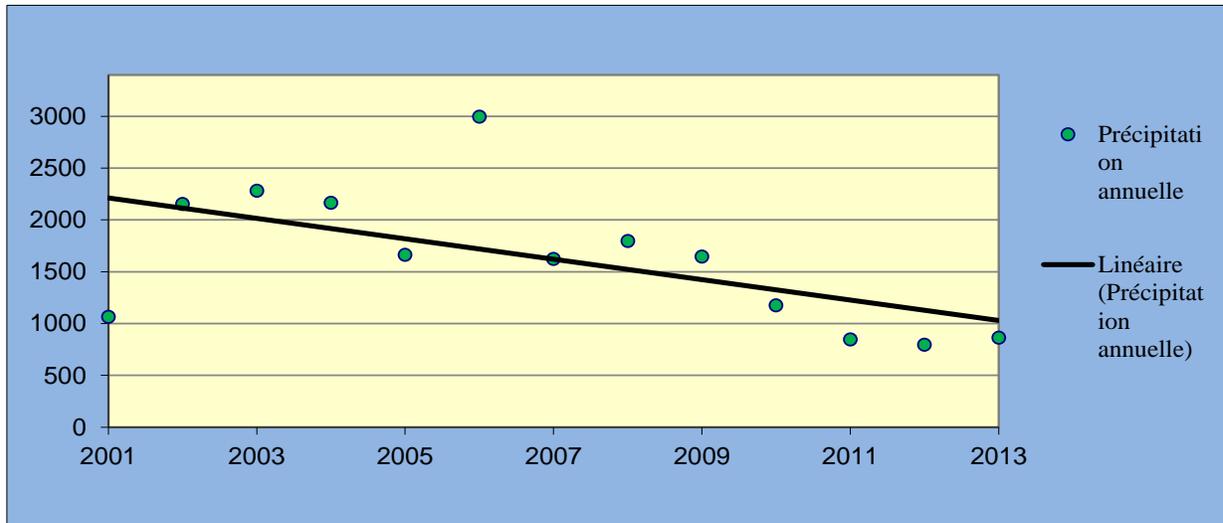


Figure 20 : Droite de tendance de la précipitation annuelle

D'après la figure 20, on peut constater une tendance à la baisse de la précipitation annuelle dans la montagne d'Ambre, c'est-à-dire une sécheresse, même si on observe une année exceptionnelle en 2006. Cette tendance à la sécheresse peut être due au changement climatique ou à des pressions anthropiques comme les feux de brousse fréquents ou les types de défrichement (« tavy », charbon de bois, exploitation forestière sauvage, etc. »).

1.4. Evolution des précipitations

Les résultats représentés sur la figure 19, peuvent être traduits comme la représentation du réchauffement de l'atmosphère lors de la seconde moitié de la saison pluvieuse. Ce phénomène est sans doute l'une des causes de la formation des précipitations sur la région.

C'est ainsi que les précipitations durant les mois de Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril seront normales ou même voisines à la normale, tandis que celles des mois de Mai à Novembre connaîtront une légère augmentation supérieure à la normale, de l'ordre de 10mm/mois.

Cette pluviométrie est soumise à une forte variabilité interannuelle. L'observation du tableau 12 et de la figure 19, montre des précipitations fortement irrégulières.

L'histogramme de la figure 19 met en évidence la présence d'une alternance de périodes (mois) plus ou moins sèches. Des années de déficits pluviométriques (2001, 2005, 2007, 2010-2013) contrastent avec des périodes relativement plus humides (2002-2003, 2006) et moyennement humides (2004, 2009). Si on se réfère à la valeur normale, on constate que les périodes humides peuvent être considérées comme déficitaires.

En effet, après quelques années de précipitations excédentaires (période 2003- 2006), une période déficitaire s'est installée au début de l'année 2007 pour se poursuivre jusqu'au début des années 2010 à 2013. Au cours de la période (2001-2013) qui dure depuis 13 ans, la tendance globale est vers la baisse (figure 20). La décennie 2003-2013 s'est distinguée comme très déficitaire malgré la présence des années humides 2003 et 2006 mais la tendance globale est à la sécheresse.

1.5. Evapotranspiration

Le tableau suivant montre le résultat du calcul d'évapotranspiration depuis 2002 jusqu'au 2013 selon la formule de Thornthwait :

Tableau n°13 : L'évapotranspiration

Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Valeur normale
T Moyenne	22,9	22,6	22,4	23,4	22,9	23,5	23,0	23,4	23,6	23,0	23,1	23,1	23,0
Pluie	2154,6	2281	2166,2	1665	2995,8	1624,2	1798	1648,2	1175,4	847,8	796	863,6	863,6
ETP réel selon la formule Thornthwait	1113,4	1204,9	1213,28	1150,61	1488,09	1200,64	1165,02	1128,73	1003,52	856,83	698,17	792,37	775,86

Pareille pour l'évapotranspiration, la baisse est apparue toujours. L'évapotranspiration potentielle s'exerce de façon presque permanente. Elle est très nettement inférieure aux précipitations. En observant ce tableau, malgré la baisse, on constate ces valeurs ne sont pas au-dessous de la normale. La pluie est suffisante. En 2025, cette situation peut changer. C'est-à-dire vue la forte exploitation de la montagne d'Ambre, le taux de précipitation peut descendre.

1.6. Insolation

La durée totale d'insolation mensuelle (en heure) est représentée dans le tableau suivant :

Tableau n°14 : Insolation. Source : Programme WAVES, (2014)

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Janvier	106,6	111,0	112,8	77,6	127,3	73,6	87,3	186,1	114,3	115,7	116,1	108,1	119,4
Février	120,8	109,0	76,8	121,8	84,4	146,4	138,2	69,6	71,8	86,6	110,3	113,1	110,3
Mars	122,1	121,9	116,5	136,9	126,1	168,1	176,5	125,9	145,3	145,3	143,8	149,3	146,4
Avril	157,5	155,9	141,4	149,4	151,4	176,6	175,1	148,1	161,3	161,8	160,5	161,2	161,4
Mai	143,4	159,6	152,6	159,6	145,6	153,3	176,1	151,1	158,9	160,7	160,2	160,7	159,6
Juin	159,4	157,7	174,4	164,4	172,6	181,9	171,7	163,1	172,5	174,1	175,4	174,6	175,3
Juillet	160,8	148,3	172,9	165,8	166,9	177,4	174,1	177,1	180,2	177,5	181,4	180,3	180,4
Août	166,6	161,6	176,6	196,0	189,2	187,8	174,0	174,0	186,0	184,6	185,9	187,6	187,0
Septembre	170,6	164,0	171,2	185,4	171,6	193,9	195,7	166,9	185,6	186,3	187,1	188,8	187,2
Octobre	172,4	169,3	182,7	178,2	172,4	150,1	172,9	166,6	189,9	190,4	191,4	191,1	190,6
Novembre	172,5	124,8	166,9	182,5	144,5	83,0	120,8	129,3	105,0	124,9	108,5	102,4	117,2
Décembre	120,0	117,9	109,8	122,2	123,4	113,2	112,0	209,3	140,6	141,4	138,3	143,1	143,6

Ce résultat nous montre que la durée de l'insolation dans cette zone est courte. Ce qui explique l'importance de brouillard à cause de fraîcheur. Les gens qui y vivent, trouvent rarement du soleil.

2. Résultat de l'étude géophysique

La combinaison des deux méthodes a permis d'avoir plusieurs indices et informations sur la géométrie et la structure hydrogéologique d'un bassin donné.

La figure suivant nous expose le plan de masse des trois panneaux effectués dans le bassin versant de Besokatra dont deux ont été effectués au droit du Lac Mahasarika (P1_1 et P1_2), et le troisième en aval du barrage de la JIRAMA (P2_1).

Les figures (22, 23 et 24) montrent les résultats du sondage géophysique réalisé.

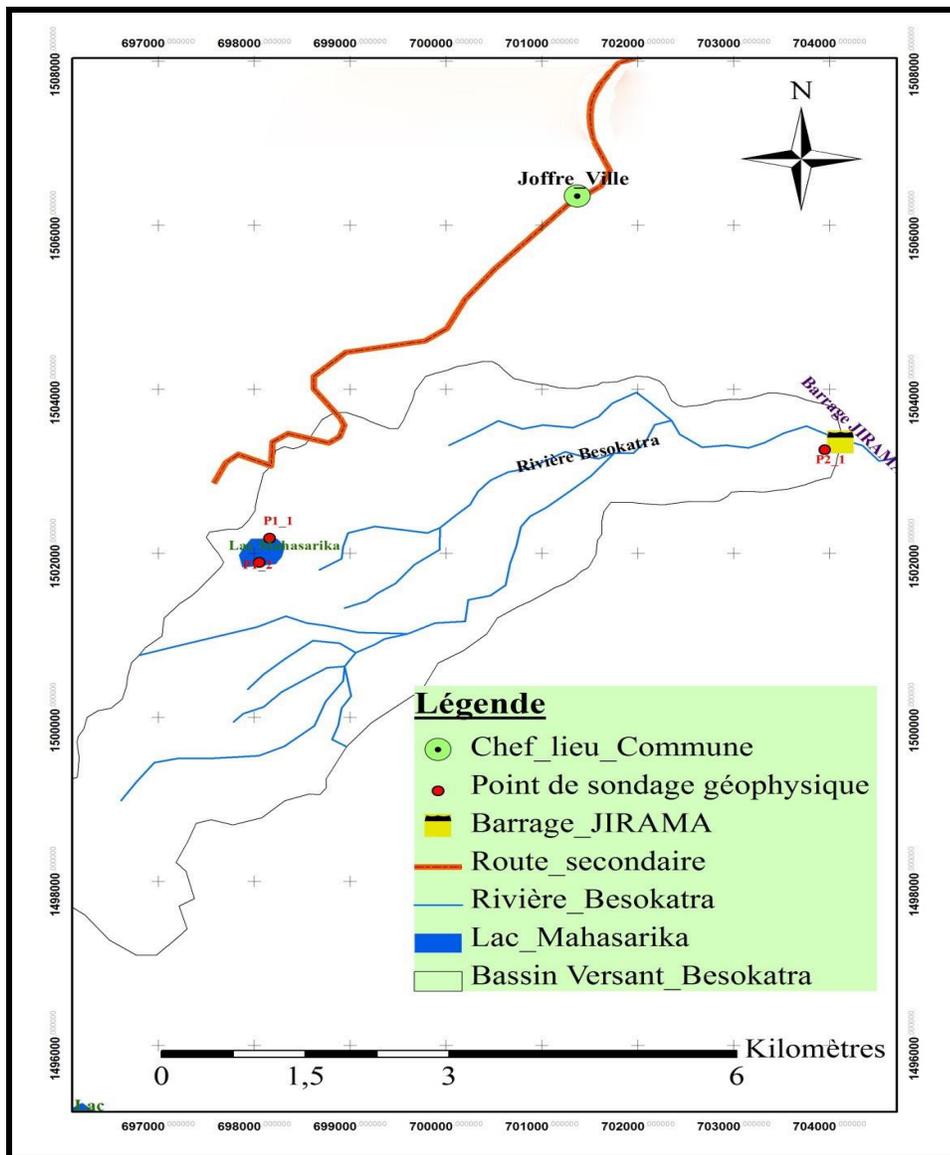


Figure 21 : Carte de localisation des profils géophysiques

La figure 22 présente la topographie en modèle 2D du panneau électrique n°1 (au sommet du lac Mahasarika : P1_1 Ambre). La longueur de mesure est 200m et distante de 7 m, permet de mesurer les résistivités et les chargeabilités des terrains. Le panneau électrique est réalisé suivant la direction NW – SE avec la partie NW est peu élevée.

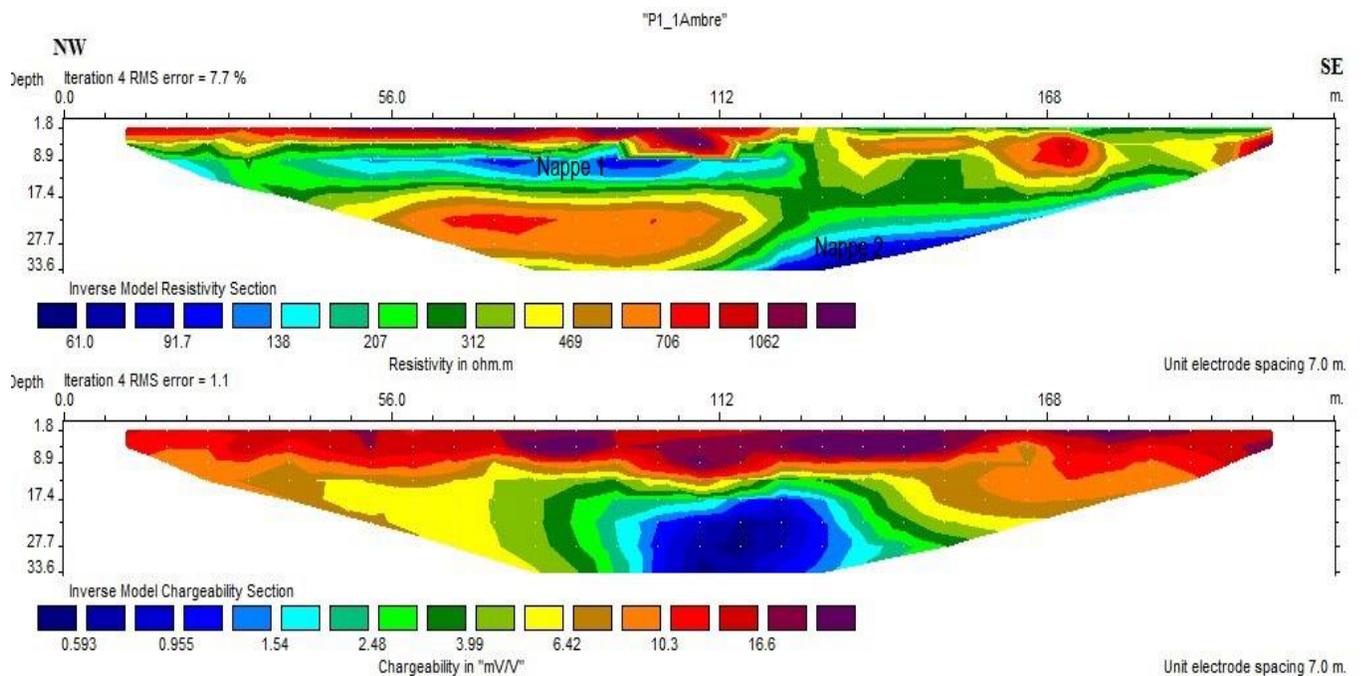


Figure 22: Modèle en 2D du panneau électrique n°1

Les modèles 2D de résistivités et de chargeabilités montrent les valeurs prépondérantes de résistivités qui vont de 250 Ωm jusqu'à 1000 Ωm et celles de chargeabilités sont de 1 à 16 mV/V. L'itération est 4 RMS avec erreur 7,7%. Une formation résistante est à 200 à plus de 1000 Ωm , de 6 à 7 m d'épaisseur. Puis, vient une formation conductrice de 40 à 100 Ωm en moyenne, d'épaisseur 5m pour la nappe 1 et se situe presque à 7m en profondeur, par contre la puissance de la deuxième nappe n'a pas pu mesurer car elle est à la limite de la profondeur de la prospection. Les couches sont presque obliques voir plissées et fissurées. Celles-ci sont justifiées par la présence de deux nappes phréatiques au beau milieu du modèle. Ces nappes sont des nappes d'altération et de formation meuble à faible perméabilité.

Ensuite c'est le deuxième point de mesure présenté sur la figure 23.

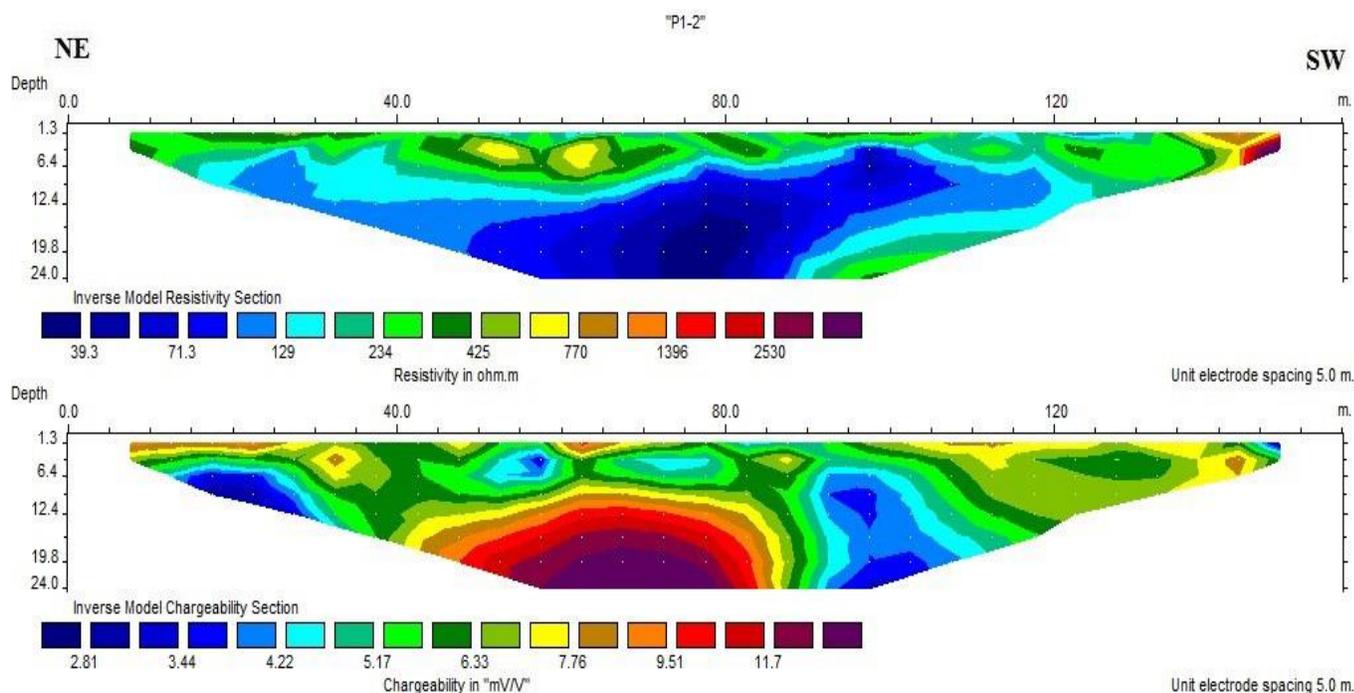


Figure 23: Structure du sous-sol sur le deuxième panneau

Cette figure montre la structure hydrogéologique au bord du lac Mahasarika. La structure lithologique est plus ou moins plissée et fissurée, de direction NE – SW.

La résistivité des couches résistantes est de l'ordre de 280 à 1200 Ω m, les couches intermédiaires : 120 à 250 Ω m et la résistivité de couches conductrices est comprise entre 35 à 120 Ω m. Le niveau piézométrique se trouve à partir de 5m en profondeur et d'épaisseur importante. La nappe phréatique est à grande perméabilité.

La longueur de mesure dépasse 150m, espacée de 5m. Les résistivités et les chargeabilités prépondérantes sont respectivement 250 à 2000 Ω m et 3 jusqu'à 11mV/V. La formation conductrice est de l'ordre de 40 à 130 Ω m. Le modèle montre que le niveau piézométrique se trouve à partir de 5m de profondeur, d'épaisseur importante : c'est une nappe en grande perméabilité.

Tandis que dans la figure 24, on voit se succéder, de haut en bas, plusieurs couches relativement sub-horizontales. Cette prospection a une longueur 120m au plus, distante de 5m. La direction du coupe est SW – NE. Les valeurs prépondérantes de résistivité vont de 15 Ω m à plus de 120 Ω m et

celles de chargeabilité de 1 à 23 mV/V. L'itération est 4 RMS avec erreur égale 5%. La faible valeur de résistivité explique que le niveau piézométrique affleure en surface.

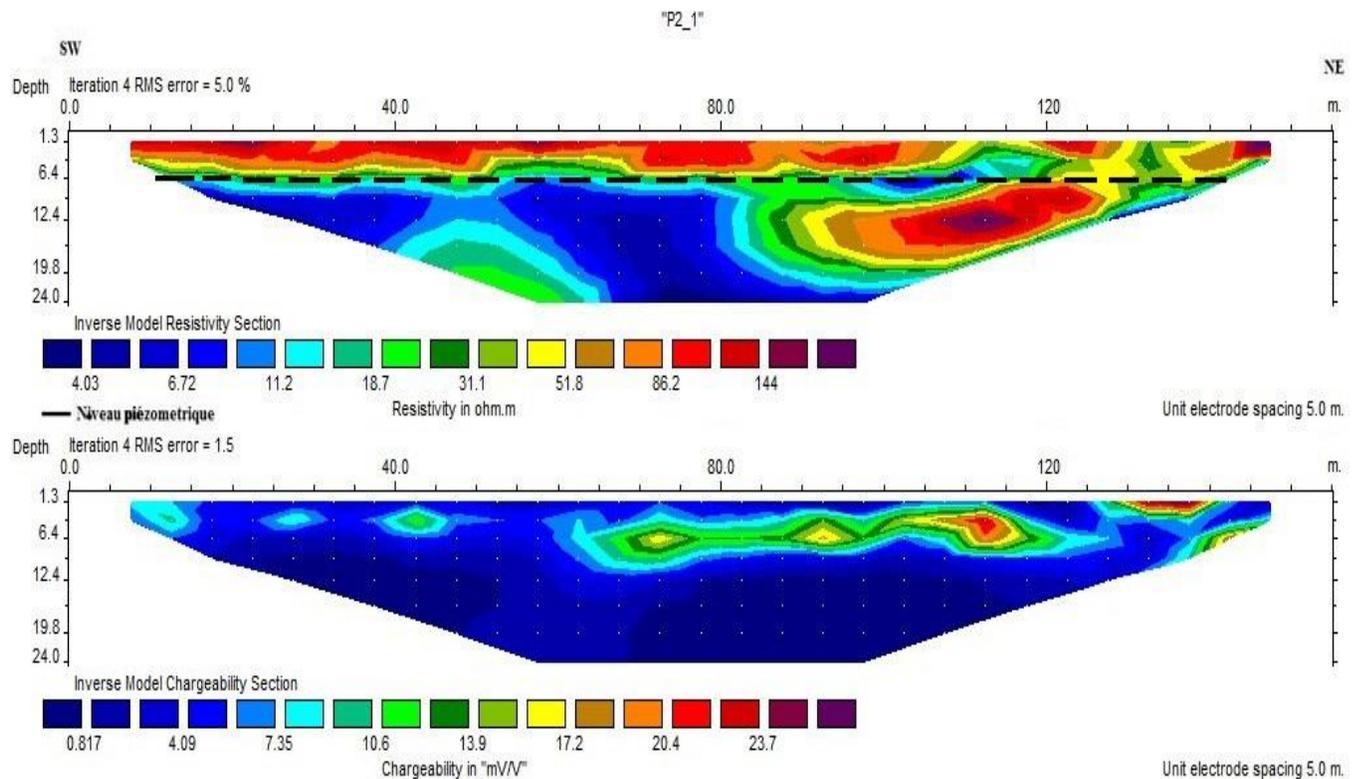


Figure 24 : Structure du sous-sol sur le troisième panneau (au niveau du barrage JIRAMA)

Donc, sur les trois résultats d'études géophysiques réalisées, on peut dire que la formation superficielle résistante de résistivité comprise entre 200-1000 Ω m en moyenne représente la couverture superficielle constituée principalement d'alluvions recouvrant tout le secteur. En-dessous, la formation moins résistante est identifiée comme étant une formation aquifère, de faible épaisseur. On ne peut espérer en tirer qu'un débit très faible. Quant à la formation conductrice (diminution de la résistivité) en moyenne comprise entre 20 et 80 Ω m. Elle est certainement constituée des nappes aquifères et forme le substratum imperméable.

Ensuite, on constate aussi que la structure de la zone soit plus ou moins homogène, et composée d'une zone non saturée de nature latéritique issue de l'altération des pouzzolanes en surface, une zone saturée avec la majeure partie est dominée par les pouzzolanes en affleurement, puis des basaltes fracturés permettant l'infiltration des eaux de pluie ou de ruissellement enfin le substratum

est évidemment des basaltes non fracturés. Car d'après la carte géologique, c'est un terrain recouvert par des basaltes et basanites (basaltes ankaratrites), d'après le cours géophysique de Pr Nadia Kassou et al. 2009/2010, D. Chapellier. 2000/01, la résistivité de basalte est comprise entre 500 à 1500 Ω m. Donc ces aquifères en questions sont constituées par des séries de basaltes fissurés du Tertiaire.

Chapitre V : ANALYSE ET TRAITEMENT DES RESULTATS

QUALITATIFS

1. Résultat géologique

Ces différentes cartes ici sont obtenues après la numérisation de la carte originale, MNT et celle de carte de relief.

1.1. Délimitation des affleurements en surface

Elle est réalisée à partir de la numérisation de carte géologique 1/100 000 du Service géologique et le résultat est montré sur la figure ci-après.

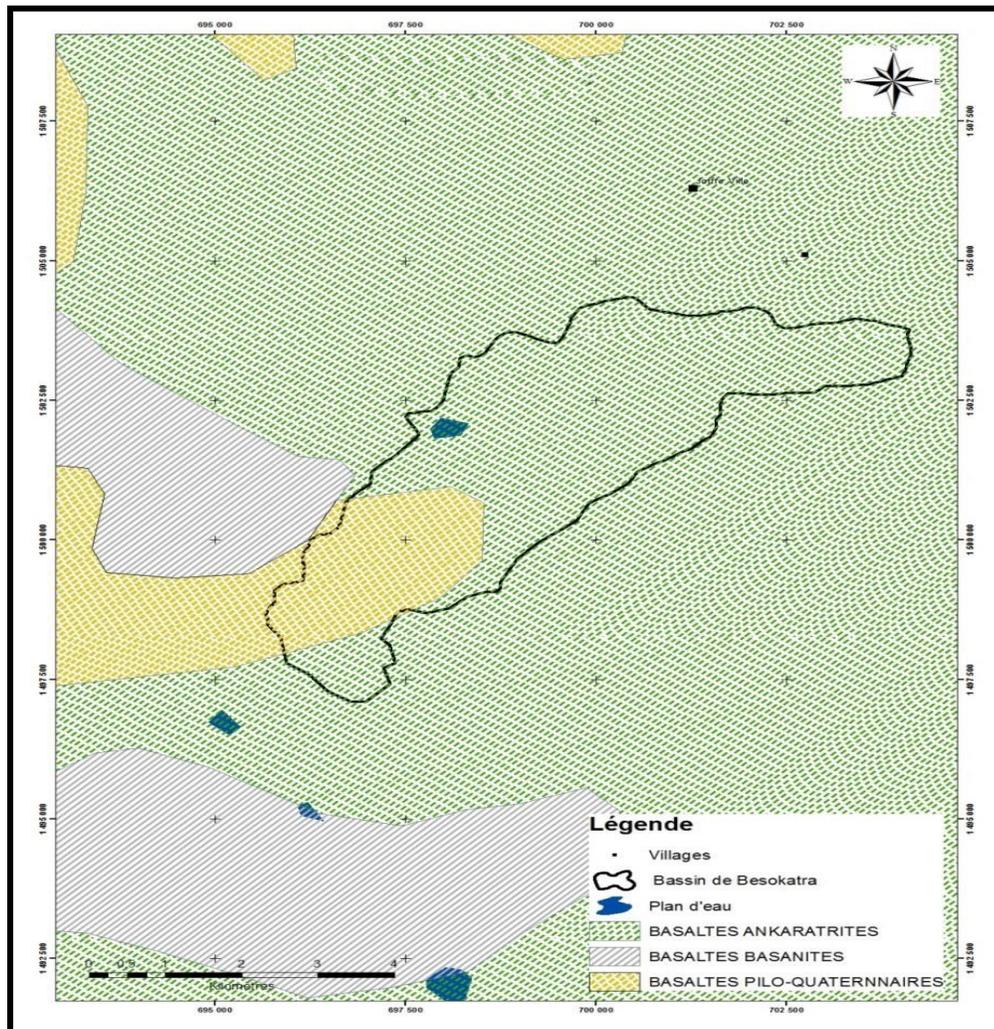
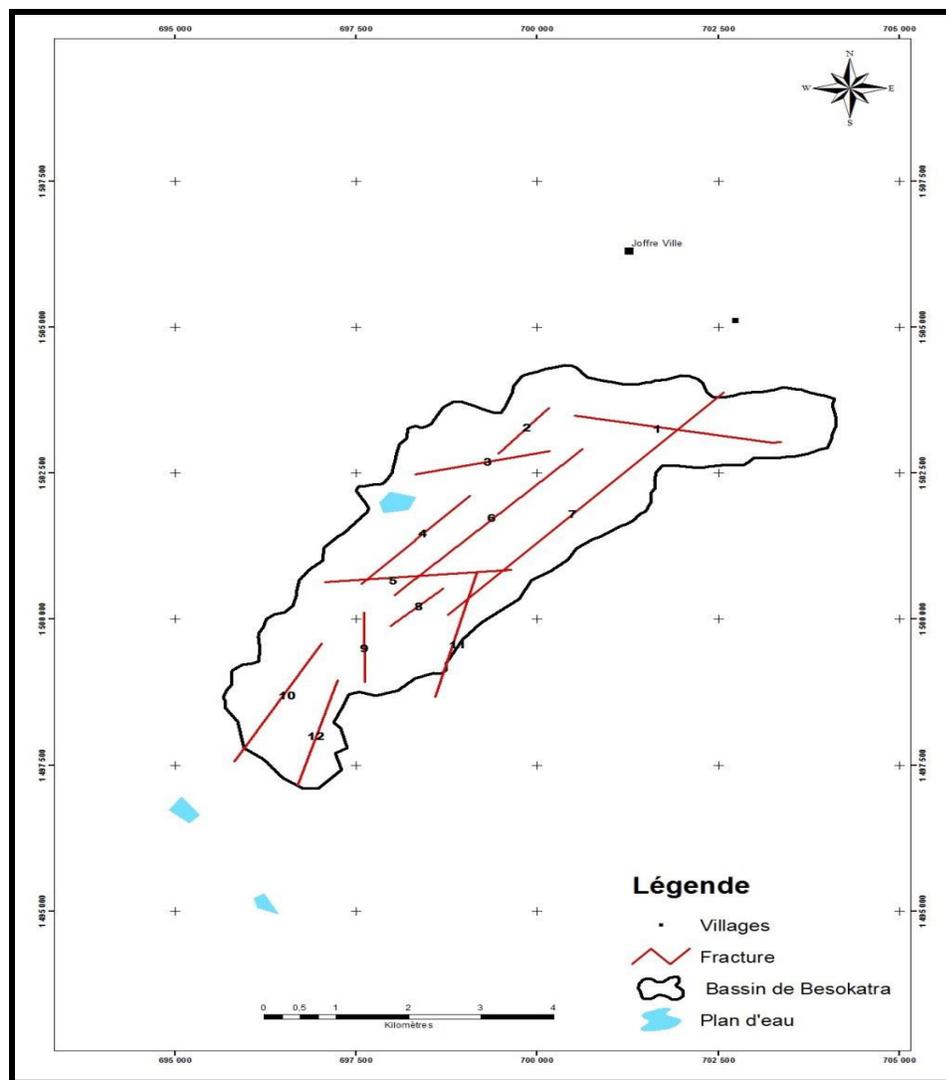


Figure 25 : Carte géologique de la zone d'étude

D'après la figure, la majeure partie de la zone d'étude se repose sur le basalte Ankaratrite et l'autre sur le basalte plio-quaternaire. Elle est confirmée par la présence du basalte Ankaratrite trouvé en surface sur le chemin en direction vers la partie Sud (cf. figure 13) et aussi aux alentours du bassin. Abondance des tufs volcaniques, des scories, des lapillis ou pouzzolanes. Plusieurs ouvrages les aient martelés.

1.2. Tracé des principales fractures

Les principales fractures de la zone d'étude ont été tracées à partir des images de relief et du MNT. Le résultat est représenté sur la figure qui suit.



En effet, les cours d'eau et le relief portent l'empreinte de la tectonique. L'un des objectifs de cette étude est de fournir une méthode efficace à la stratégie de la prospection d'eau dans le cadre du choix des sites à prospector.

Tableau 15 : Résultat récapitulatif des différentes fractures identifiées

N° de fracture	Orientation
1	WNW – ESE
2	NE – SW
3	ENE – WSW
4	ENE – WSW
5	ENE – WSW
6	NE – SW
7	NE – SW
8	ENE – WSW
9	N – S
10	NNE – SSW
11	NNE – SSW
12	NNE - SSW

L'étude microtectonique réalisée sur les affleurements indique une prédominance des fractures ENE – WSW. Nous avons alors les résultats statistiques suivants (tableau 16).

Tableau 16 : Résultats statistiques des fractures

Orientation	Fréquence	Pourcentage (%)
NS	1	8,33
NNE - SSW	3	25
NE – SW	3	25
ENE – WSW	4	33,33
WNW – ESE	1	8,33

On obtient ainsi une rosace directionnelle représentée ci-après.

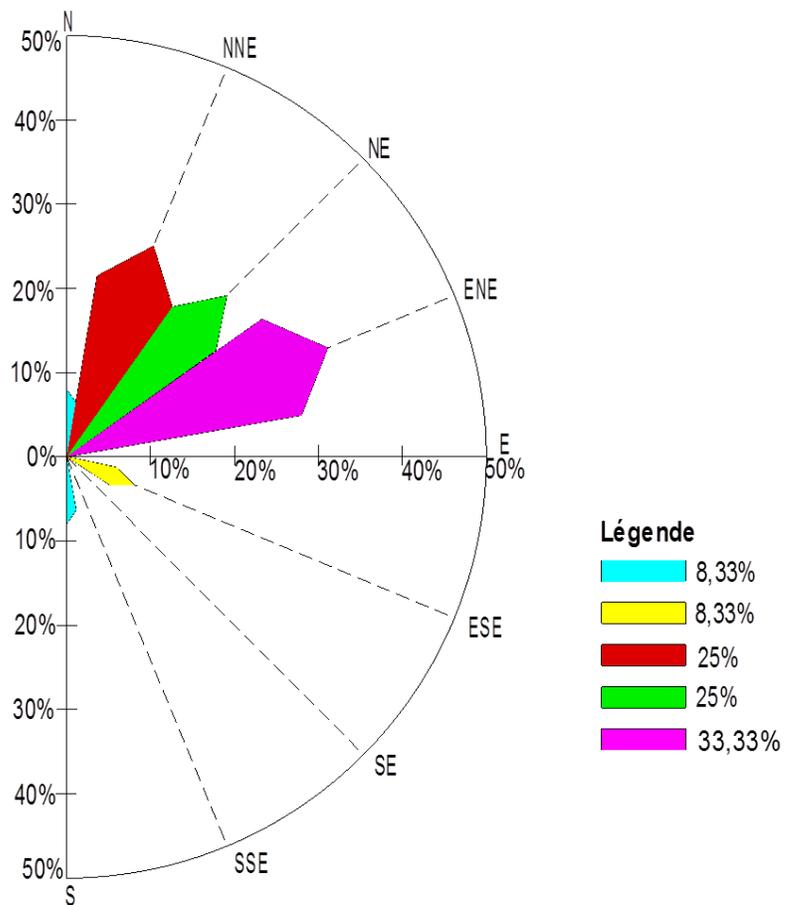


Figure 27: Diagramme de distribution des linéaments

La distribution directionnelle des fractures (tableau 11) fait ressortir trois grandes classes de direction ENE - WSW, NNE – SSW, et NE – SW.

La classe de direction ENE–WSW (33,33% de l'ensemble des effectifs) constitue la direction majeure de la trame linéamentaire. Les deux principales directions secondaires sont les classes NNE – SSW (25%) et NE-SW (25%).

1.3. Restitution de la carte géologique

A partir de la superposition de la carte de fractures (figure 26) et de la carte géologique numérisée (figure 25), on obtient la nouvelle carte géologique ou carte de synthèse présentée sur la figure 28.

Cette nouvelle carte a servi de support à la compréhension et à l'interprétation des mécanismes tectoniques qui ont modelé le paysage du site étudié.

2. Qualités des eaux à la Montagne d'Ambre

Selon l'OMS et le code de l'eau article 38 : toute eau destinée à la consommation doit être potable, soit naturellement ou par traitement, répond à normes physico-chimiques, bactériologiques, organoleptiques et biologiques fixées par décret.

Du point de vue qualité, l'eau de la rivière Besokatra apparaît très claire (transparente) et froide en amont par rapport en aval. Elle a un goût très doux.

Avant la source est isolée du village et des lieux d'activités agricoles des habitants. Cela permet de déduire que la source ne risque pas de subir une contamination et des pollutions d'origine fécale, porteuses de germes pathogènes tels les coliformes et E. Coli. Mais actuellement vue l'ampleur de la culture des Khats et exploitations illicite aux alentours de cette zone, il est nécessaire d'effectuer toutes analyses que ce soit bactériologique, biologique, physico-chimique et organoleptique afin d'examiner l'existence de constituants naturellement présents ou apportés par la pollution.

Voici l'analyse physico-chimique réalisée par la JIRAMA (tableau 17).

Tableau 17 : Rapport d'analyse physico-chimique de la rivière Besokatra (Source JIRAMA, (2016))

Paramètres	Amont	Aval	Norme
Date de prélèvement	20/03/2015	21/03/2015	
Température (°C)	21,6	22,5	20 à 25
Turbidité NTU	21,1	25	< 5
pH	7,57	7,32	6,5 à 9
Conductivité µs/cm	80	85,4	< 3000
Minéralisation mg/l	75	77	
Dureté totale °F	9,6	10,2	< 50
Dureté calcique °F	3,9	4,1	
Titre alcalimétrique °F	0	0	
Titre alcalimétrique complet °F	3,5	3,6	
Matières organiques mg/l	1,2	2,4	< 2
Ammonium mg/l	0,01	0,42	< 5
Fer total mg/l	0,08	0,12	< 0,5
Chlorures mg/l	6,39	7,1	< 250
Sulfates mg/l	0	0	< 250
Nitrites mg/l	0	0	< 0,1
Nitrates mg/l	0	0	< 50
Calcium mg/l	15,6	16,4	
Magnésium mg/l	13,85	14,82	
Carbonates mg/l	0	0	
Bicarbonates mg/l	42,7	43,92	
Sodium mg/l	4,14	4,60	

Observation	NC	NC	
--------------------	----	----	--

Ce tableau montre que l'eau est généralement de bonne qualité, malgré les non-conformités bactériologiques occasionnelles par rapport à la norme recommandée par l'OMS (voir tableau n°1, annexe 1) et l'Institut Pasteur de Madagascar. Les valeurs écrites en rouge sont des valeurs qui dépassent la normale suivant les normes de l'Institut Pasteur de Madagascar.

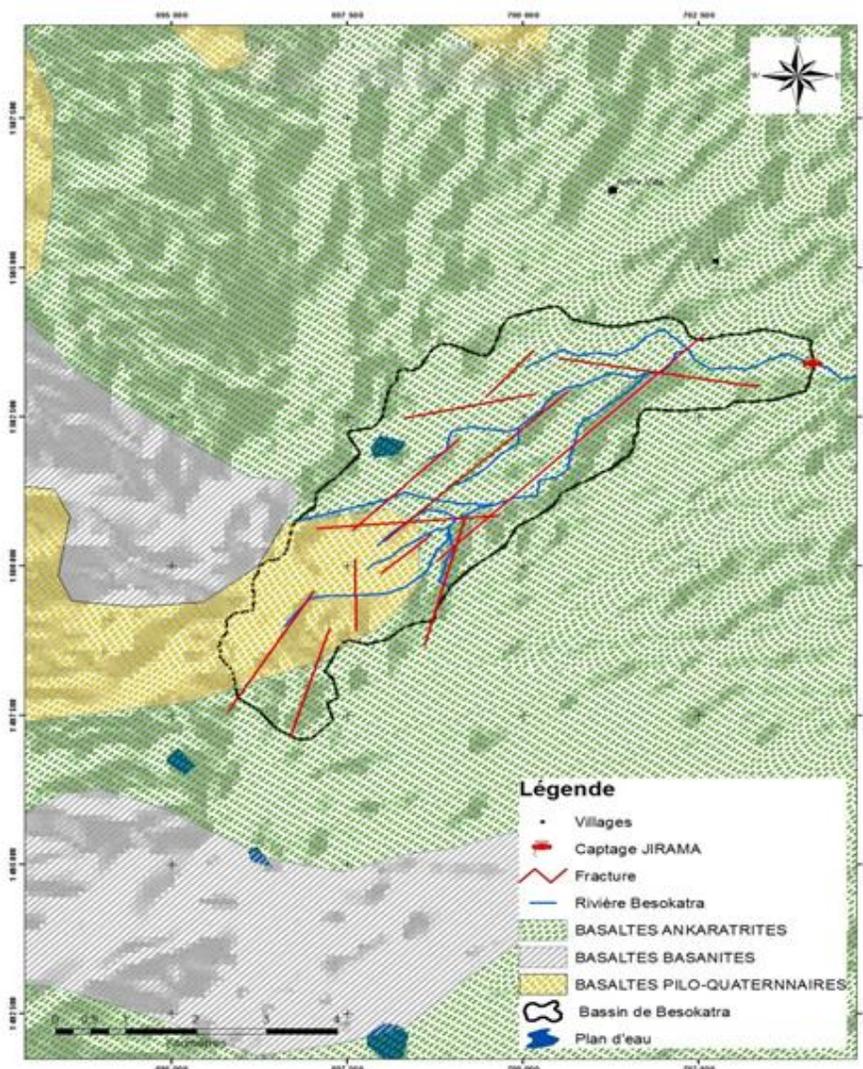


Figure 28 : Carte de synthèse

Tels sont donc les résultats et leur interprétation. La discussion et quelques recommandations sont présentées dans la partie suivante.

Partie IV

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Chapitre VI : EVALUATION DES RESSOURCES DISPONIBLES

Pour connaître les stocks disponibles dans le bassin versant de Besokatra, il est nécessaire d'évaluer les réserves en eau souterraine et celles de la surface car il est évident que ces deux types d'eau se soutiennent mutuellement surtout en période d'étiage. C'est l'eau souterraine qui est responsable de la transpiration des plantes et l'évaporation du sol. Ce phénomène est appelé l'évapotranspiration.

1. Source

L'eau du lac Mahasarika s'infiltré dans la nappe phréatique de la montagne d'Ambre, sort à 2km vol d'oiseau et donne la source à la rivière Besokatra. La profondeur maximale du lac est de 8m (période de pluie) et 4m profondeur minimale. A part l'infiltration de l'eau du lac Mahasarika, il y a aussi la précipitation et l'évapotranspiration.

2. Evaluation des eaux de surface

Pour évaluer les eaux de surface, on procède à l'évaluation des volumes d'eau brute avant traitement au niveau barrage de captage de la JIRAMA ainsi l'inventaire des volumes d'eau prête à mise en réseau au niveau du réservoir de la JIRAMA et l'inventaire de l'utilisation interne et les débits de flux par utilisation.

Cependant, des travaux de jaugeage (moulinet) ont été exécutés dans la rivière Besokatra en amont et en aval du barrage de la JIRAMA par le projet WAVES en Juin 2014. Ces travaux de mesures réalisés donnent des résultats respectifs 0.40 m³/s et 0.26 m³/s. Après une visite des champs de cultures a été effectuée dans le haut bassin de Besokatra, région d'Anjavona. 5 canaux en terre dérivés en permanence vers les champs de culture irriguée ont été identifiés. Ces canaux sont construits non seulement pour irriguer les champs de culture, mais spécialement pour champs de Khat, et aussi transféré ou dévié vers d'autres bassin versant pour le même objectif. Le débit total de ces 5 canaux est estimé à 62 l/s dont les détails sont montrés dans le tableau ci-après :

Tableau 18 : Débits estimatifs des canaux (source : Programme WAVES (2014))

N° du Canal	1	2	3	4	5	Total
Débit (l/s)	10	12	15	10	15	62



Photo 7: L'un des canaux irrigués et les activités dans la région d'Anjavona

Sur ce, les résultats de mesure indiquent que les stocks d'eau de la Besokatra est de l'ordre de 0.470 m³/s pour le mois de juin. A partir des données de précipitation mensuelle et les données de débit ponctuel, le débit mensuel du bassin de Besokatra au niveau du Barrage de JIRAMA sont estimés comme suit (tableau 19). Les débits illustrés tiennent compte les débits dérivés dans les cinq canaux supposés comme constant (tableau 18).

Tableau 19: Stock d'eau moyen mensuel et moyen annuel (source : Programme WAVES (2014))

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuel
Q(m ³ /s)	7.38	6.89	3.75	1.14	1.11	0.47	0.64	0.50	0.27	0.30	0.89	3.59	2.24

A signaler que le nombre des canaux dans cette zone est augmenté, il est sept (7) actuellement.

3. Les potentialités en eau souterraine

Le présent paragraphe se propose de donner les informations pouvant rendre compte de la situation actuelle des ressources exploitées pour satisfaire les besoins en avenir (2025).

L'eau des précipitations peut ruisseler en surface, et participer à la formation des cours d'eau aérien, ou s'infiltrer en profondeur et donner naissance à des nappes souterraines. La proportion

d'eau qui ruisselle et qui s'infiltré dépend de la perméabilité et de la porosité du sol et des roches du sous-sol.

Puisque la montagne d'Ambre est située dans la zone classée humide à forte pluviométrie, la précipitation annuelle varie de 1200mm à 2000mm. Cependant le bassin hydrographique de Besokatra prend source dans le climat d'altitude avec des vents du Sud – Est très fort (Varatraza) et que la précipitation annuelle de la Besokatra peut dépasser 2000mm, mises en regard de la pluviométrie moyenne sur les bassins, sommairement évaluée à environ 2 500mm (Chaperon et al; (1993)).

Pour évaluer le volume des eaux souterraines, on procède normalement soit par estimation du niveau imperméable par une étude géologique appropriée, soit par détermination des paramètres physiques (coefficient d'emménagement, transmissivité, perméabilité, porosité,...) de l'aquifère ou encore par des mesures des niveaux piézométriques malgré la baisse des autres paramètres actuellement à cause de pressions exercées y afférentes (changement climatique, déforestation,...).

Sur ce, compte tenu de l'insuffisance de données disponibles relative à ces paramètres, on va adopter des hypothèses pour illustrer et avoir une idée sur la synthèse de la caractéristique (épaisseur, porosité...), la potentialité de l'aquifère du sous bassin de Besokatra.

Tableau 20 : Potentialité en eau souterraine dans le bassin de Besokatra. Source programme WAVES (2014)

Unités	Volume aquifère		Porosité efficace **		Volume d'eau renouvelable/an	
	1er cas	2èm cas	1er cas	2èm cas	1er cas	2èm cas
m ³	880 000 000	1 760 000 000	44 000 000	88 000 000	27 720 000	55 440 000
Km ³	0,880	1,76	0,044	0,088	0,028	0,055

Dans le tableau 20, le volume d'aquifère, la porosité efficace et le volume d'eau renouvelable/an sont estimés en fonction des résultats géophysiques obtenus, de la pluviométrie moyenne mensuelle et de la surface du bassin versant.

-
- ✓ Pour le premier cas, l'épaisseur de la nappe est estimée à 40 mètres tandis que pour le 2e cas, elle est de 80 mètres. Par rapport à ces épaisseurs, et en tenant compte des différentes résistivités apparentes données par les résultats géophysiques réalisés (figures 22, 23 et 24), la porosité efficace de l'aquifère est évaluée à 5%, valeur équivalente à la moyenne de celle de l'alluvion ou colluvion latéritique (Nadia Kassou & Ilias Kacimi, (2009)), et de l'ordre de 2% pour les produits de projections volcaniques, à l'exclusion des basaltes fissurés et très fissurés.
 - ✓ Ces porosités efficaces donnent ainsi une idée sur le taux de saturation qui est évalué à 65 %. Ce taux représente le tiers supérieur de la formation prospectée qui est considérée comme une zone non saturée.
 - ✓ A titre indicatif, la valeur du volume d'eau renouvelable annuel est fournie en fonction de la capacité de saturation de l'aquifère et de la porosité efficace de la formation constituante. Par ailleurs la ressource disponible renouvelable de cet aquifère est conditionnée par la recharge disponible proportionnelle à la pluviométrie de la zone considérée.

Enfin, les résultats des études montrent que la valeur moyenne annuelle du stock en eau souterraine dudit bassin est de l'ordre de 0.041 km³/an (hypothèse basse 0.028 km³/an, hypothèse haute 0.051 km³/an), équivalent d'un débit nominal de 1.3 m³/s.

Chapitre VII : BESOINS EN EAU ET LEUR EVOLUTION

La connaissance des utilisateurs et de l'utilisation de l'eau issue du bassin d'études est très importante pour dresser le compte d'utilisation, sur ce faire il faut :

1. Flux interne

La montagne d'Ambre est l'une des aires protégées gérée par Madagascar National Park (MNP) à cause de l'existence encore de faunes et flores naturelles. Néanmoins, plusieurs parties périphériques de la zone sont déjà exploitées et transformées en champs de diverses cultures et utilisent l'eau issue de la rivière Besokatra et/ou ses affluents pour l'irrigation quelques soit en amont ou en aval du barrage. Celle-ci est considérée comme compte de flux interne. Car cela nous permet de rendre compte l'existence et l'ampleur de l'utilisation des apports de cours d'eau, pénalisante pour la production d'eau potable.

L'évaluation de flux tient compte des prélèvements d'eau par les différentes végétations (forêts, agriculture) dans le haut bassin.

D'après l'enquête réalisée par l'INSTAT à Diego Suarez, la population de Bezavona et Anjavona compte environ 300 personnes dispersées dans 80 ménages. Ce qui veut dire 60% de la population utilisent l'eau déviée de la rivière Besokatra pour leur besoin. Donc la quantité d'eau utilisée par jour est estimée à 80 litres par ménage, soit 3.84 m³/j au total. Toutefois, en ce qui concerne l'agriculture dans ces fokontany (culture des khats très développée, cultures vivrières et maraichères (carotte, haricot vert, choux, tomates)), les prélèvements d'eau pour irrigation à partir des cinq canaux en terre tiennent beaucoup compte où les débits de prélèvement sont estimés à 62 l/s au total (cf. tableau 20). Les disponibilités d'eau deviennent de plus en plus menacées par l'irrigation de ces cultures de Khat dans le haut bassin de Besokatra et de l'acte vandalisme.

Au Montagne d'Ambre, selon les du village les plaines ne connaissent généralement que deux saisons pour la riziculture et une seule pour les autres cultures sauf le khat durant toutes saisons.

Les calendriers agricoles pour chaque type de culture sont presque étendus sur toute l'année avec un rythme plus accéléré pendant la saison pluvieuse, et conditionnés par le rythme pluviométrique et les types de cultures. Les périodes de pointes se situent au moment des travaux de préparation du sol. La plupart des produits sont récoltés entre le mois de juillet et le mois de

septembre .Tandis que les cultures de contre saison s'étalent du mois d'octobre au mois de décembre.



Photo 8 : Champs de Khat à Anjavona



Photo 9 : Vue générale de la zone d'étude

Les pertes dues aux infiltrations et aux fuites des débits délivrés dans les ouvrages d'irrigation traditionnelle de différents types de culture entraînent à un gaspillage d'eau.

Lors de notre passage, en Juin et Juillet 2016, aux étendues déjà plantées, s'ajoute un défrichage important du bassin, localisé en rive droite, et qui semblerait attendre de nouvelles cultures du khat, ou résulterait d'une exploitation illicite de forêts. Tout cela présente des impacts sur la qualité de l'environnement, et la régression des apports de la rivière.

Ensuite, sept canaux d'irrigation ont été remarqués, dont cinq sont creusés en rive droite, et deux sur la rive gauche. En aval des champs de khat, ces canaux irriguent des rizières, récemment créées. Les canaux sont des canaux en terre, non revêtus. Quatre des sept canaux étaient secs.

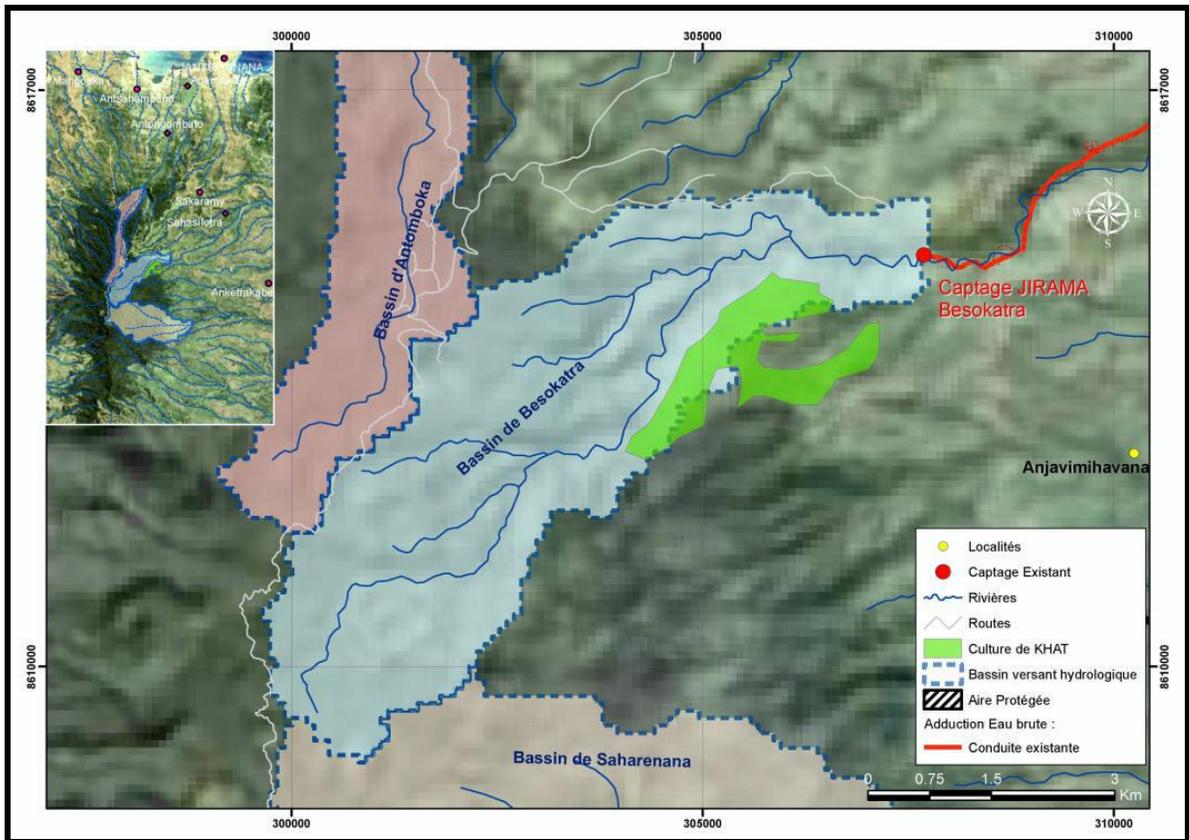


Figure 29 : Carte d'étendue de la culture de khat en amont du captage de Besokatra

Ainsi, le besoin en eau de zébus qui compte environ 300 têtes utilisent une importante quantité d'eau.

Conclusion sur la situation d'eau du bassin versant de Besokatra

Ces barrages tirent beaucoup d'eau qui devrait déverser dans la rivière de Besokatra c'est ce qu'on voit sur le tableau n°18. La saison sèche est le moment où l'on assiste à la diminution remarquable du débit des cours d'eau et au tarissement de tous les plans d'eau à cause de l'absence de pluie. C'est aussi le moment de l'apparition des conflits d'usage, au niveau de ces barrages traditionnels, manifestés au début de mois de mai pour pouvoir accaparer le maximum d'eau possible sans se soucier des autres consommateurs.

Les agriculteurs qui cultivent les espaces près de la Montagne d'Ambre n'utilisent pas la technique de conservation d'eau du sol. Ils n'emploient pas non plus d'engrais chimiques. L'utilisation massive des plans d'eau existants leur est prioritaire pour améliorer leurs rendements.

Les terrains placés loin du canal ou des points d'eau sont presque abandonnés durant la période sèche. Et les paysans essaient de trouver des terres arables aux alentours de ce parc qui occasionnent le défrichage clandestin.

Des sols dénudés et parfois érodés d'une part, des sols imbibés trop d'eau, d'autre part ont été remarqués le long du bassin versant d'où le risque probable de l'ensablement et déposition des alluvions. Cela veut dire que le partage de l'eau pour l'irrigation n'est pas du tout équitable. La JIRAMA, au moins depuis 3 ans, ne faisait pas ses tâches obligatoires de curage et de nettoyage au niveau de ce barrage. Son gardien, avec sa conscience professionnelle et de son propre gré, même s'il est déjà retraité depuis 3 ans, occupe toujours ce poste, effectue chaque année les tâches minimales de curage avec la pelle. Il dépose des pierres et des arbustes en dessous du barrage pour obtenir plus de débit sur l'écoulement d'eau d'après lui. Le niveau de la hauteur d'eau avant barrage tourne autour de 1 m de profondeur en moyenne aujourd'hui, alors qu'il était plus de 3m auparavant.

2. Usage externe

Comme le flux interne est l'utilisation locale comme l'agriculture, prélèvements pour divers consommations alors que l'utilisation externe consiste à l'Adduction d'Eau Potable (AEP) de la ville d'Antsiranana et ses environnants et au gaspillage. L'étude des utilisations externes ont été faites à partir des données fournies par la JIRAMA et la Commune Urbaine de Diego-Suarez. C'est-à-dire nous allons analyser la demande en eau et l'efficacité du service de ressource en eau.

2.1. Utilisation mensuelle

Avec le Plan d'Urbanisme Directeur (PUDi), la liste des abonnés établie par la JIRAMA locale mise à la disposition, on a pu géolocaliser les différents abonnés de la ville d'Antsiranana et définir les axes des extensions vers Sud du réseau de distribution. La géolocalisation permet de comparer ou d'évaluer le taux de desserte et les éventuelles densifications des points d'eau.

Malgré le taux démographique accéléré dans la Commune Urbaine de Diego-Suarez compte environ 182032 (recensement effectuée en 2015 par la Région DIANA), c'est la ville très desservie à Madagascar. La croissance démographique est estimée à 2.90%, le nombre de population

desservis en 2015 est de l'ordre de 121 726 sans compte Fokontany Anamakia (liste en annexe) et Cap Diego car ils ne sont pas desservis en Eau Potable par la JIRAMA.

L'eau du bassin BESOKATRA est utilisée principalement pour l'alimentation en eau potable de la ville. Ces usages se classent en deux groupes de consommateur :

- gros consommateur (≥ 1000 m³/mois): ce sont les grandes industries comme le SECREN (consomme plus de 5546 m³/mois), la PFOI et la STAR cf. annexe I tableau n°5;
- simple consommateur (le ménage, petite entreprise, la perte d'eau suivant la conduite de distribution, la conduite d'amenée...).

Pour estimer la ressource de Besokatra, on doit tenir compte du volume d'eau brute (flux d'eau parvenu du bassin versant de Besokatra, de la perte d'eau par traitement et par usage domestique puis le volume d'eau mise en réseau et vendue (cf. tableau 21).

Suite au défaut du matériel, pour les trois ou quatre dernières années, la JIRAMA n'arrivait pas à comptabiliser les stocks et les mouvements de l'eau

2.2. Analyse de la demande en eau

Comme les autres centres gérés par la JIRAMA, les prévisions de la demande en eau se font actuellement sous deux hypothèses, de type tendanciel et suivant l'ODD (Objectif du Développement Durable).

❖ Les paramètres de prévision

La dotation unitaire ou demande en eau spécifique, par habitant et par jour, est à la base de l'estimation de la demande moyenne. Elle a été déterminée à partir des résultats de la projection des ventes, du nombre d'abonnés, et du nombre moyen d'habitants desservis, par branchement particulier, ou par BF.

Pour les deux hypothèses, la dotation unitaire par branchement particulier est la même. Elle a été tirée de l'analyse des consommations en eau et estimée à 120 litres par jour par personne pour les branchements particuliers pour Antsiranana Ville et 100 litres pour les Communes Rurales de Ramena et de Sakaramy. Par contre, elle est différente pour les bornes fontaines : de 42 litres par personne pour la ville et 30 litres pour les communes rurales limitrophes.

Tableau n°21 : Flux d'eau mensuel gérée par la JIRAMA. (Source JIRAMA (2016))

UTILISATION EAU ET DIVERSES PERTES													
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Quantité (m3)													
Estimation eau brute (barrage)	7 002 636	7 850 025	7 014 240	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666	7 302 666
Manque	0	0	0	0	806 919	1 728 023	1 399 501	1 242 303	1 789 016	1 332 423	1 724 617	1 719 015	1 770 858
Eau brute (PK 7)	7 002 636	7 850 025	7 014 240	7 302 666	6 495 747	5 574 643	5 903 165	6 060 363	5 513 650	5 970 243	5 578 049	5 583 651	5 531 808
Eau de lavage (perte 1)	0	0	0	0	0	17 961	29 940	23 812	36 365	378 567	200 624	162 227	55 486
						0,32%	0,51%	0,39%	0,66%	6,34%	3,60%	2,91%	1,00%
Eau traitée (distribuée)	7 002 636	7 850 025	7 014 240	7 302 666	6 495 747	5 556 682	5 873 225	6 036 551	5 477 285	5 591 676	5 377 425	5 421 424	5 476 322
perte 2				2 329 066	1 728 058	1 398 526	1 155 889	1 309 036	1 217 447	1 206 367	1 076 116	1 275 482	1 453 681
Vente				4 973 600	4 767 689	4 158 156	4 717 336	4 727 515	4 259 838	4 385 309	4 301 309	4 145 942	4 022 641
Rendement				68%	73%	75%	80%	78%	78%	78%	80%	76%	73%
Perte 1 + Perte 2				2 329 066	1 728 058	1 416 487	1 185 829	1 332 848	1 253 812	1 584 934	1 276 740	1 437 709	1 509 167
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Débit prélevé (m3/h) (PK7)	799,39	896,12	800,71	833,64	741,52	636,37	673,88	691,82	629,41	681,53	636,76	637,40	631,48
Eau brute PK7 journalière	19185,30	21506,92	19217,10	20007,30	17796,57	15272,99	16173,05	16603,73	15105,89	16356,83	15282,33	15297,67	15155,64
Débit distribué (m3/h)	799,39	896,12	800,71	833,64	741,52	634,32	670,46	689,10	625,26	638,32	613,86	618,88	625,15
Eau distribuée journalière	19185,30	21506,92	19217,10	20007,30	17796,57	15223,79	16091,03	16538,50	15006,26	15319,66	14732,67	14853,22	15003,62

Quant aux nombres de personnes desservis par type de branchement, l'enquête a fait ressortir qu'un branchement particulier est utilisé en moyenne par 10 personnes tandis qu'une borne fontaine dessert en moyenne 150 personnes. Ce dernier pouvant varier de 150 à 250 suivant les communes concernées.

Le coefficient de pointe journalier de l'année (cpj) est le rapport entre la demande moyenne de la journée ($dmoyj$), à la demande maximale du jour de l'année ($dmaxja$) où la consommation est maximale. Hormis le comportement des usagers et leurs habitudes de consommation, la demande de pointe se présente généralement en fin de journée pendant la période la plus chaude de l'année.

$$cpj = \frac{dmoyj}{dmaxja}$$

Généralement, le coefficient de pointe est défini à partir des historiques des productions de pointe enregistrées au cours des cinq dernières années. En moyenne, il est égal à 1,20. Ce coefficient sera le même et pour les deux hypothèses.

Le rendement d'un système d'AEP permet de situer le volume des pertes ou « eaux non comptabilisées », par rapport au volume produit net. Il caractérise l'état du réseau et l'efficacité des services commerciaux. Comme il est assez difficile de spéculer sur l'importance des pertes techniques et commerciales, l'objectif de rendement suivant a été retenu.

Partant de la situation actuelle où le rendement est de 79%, à l'horizon 2015, ce taux est préconisé atteindre 85%. Il sera le même pour les deux hypothèses de prévision.

❖ **Projection de la demande**

La demande recherchée ici, est la production nécessaire à la satisfaction des besoins. Dans le cas de l'hypothèse de croissance tendancielle, cette demande se calcule pour une année donnée, en multipliant la dotation unitaire par l'effectif de la population, réparti suivant leur mode de desserte (par BP ou par BF), pour l'année considérée.

Pour connaître la demande à la pointe, le résultat ainsi obtenu est alors multiplié par le coefficient de pointe. Et enfin, pour tenir compte des pertes d'eau non comptabilisées au niveau de

la production, du transfert, et du réseau, ce besoin net est divisé par le rendement du système, d'où la demande cherchée.

Ce processus est le même dans le cas d'une prévision de la croissance sous l'hypothèse ODD. La différence se situe, au niveau de la projection des taux de desserte, dans lequel cas, le taux de la population ayant accès de manière permanente à l'eau potable doit passer à 86,6%, en 2015. Les tableaux n° 6 et 7 en annexe résument les prévisions de la demande selon l'hypothèse tendancielle et ODD.

3. Comparaison entre stock et flux

L'étude des stocks d'eau et du flux effectuée par le Ministère de l'Eau pour la mise en œuvre de l'initiative WAVES en 2014 met en évidence les menaces sur la ressource de Besokatra. Les jaugeages au barrage de la JIRAMA ont conduit à un débit de 270l/s, soit 23.300 m³/j, alors que le rapport de Diagnostic mentionne un débit maximum prélevé en janvier 2014, de 21.600 m³/j soit de 250 l/s.

En considérant, l'eau disponible au niveau du barrage de la JIRAMA décrit au-dessus, dont le débit minimal est estimé à 0.27 m³/s pour le mois de septembre. En supposant que l'utilisation interne dans le bassin de Besokatra reste constante (72 l/s). Alors, l'eau disponible est estimée à 518 400 m³/j. Si on fixe à 500 000 m³/mois, le besoin en eau mensuelle de la ville suivant la consommation d'eau dans le Tableau V (en annexe) montre que pas de pénurie d'eau dans la ville de Diego-Suarez. La ressource est juste suffisante pour fournir les besoins en eau de la ville d'Antsiranana.

4. L'estimation de quantité des ressources en eau existantes

Les ressources sont constituées par l'eau de surface, les eaux souterraines, l'eau de pluie et l'évapotranspiration. Pour estimer ou évaluer leurs quantités, on analyse les résultats les études plus récentes réalisées par le projet WAVES au niveau de ce bassin versant et celui du PIC et de la JIRAMA.

Selon l'initiative WAVES, le débit minimal au niveau du barrage de Besokatra est estimé à 0,27 m³/s et les apports ou les capacités sont estimées à 23.300 et 25.900 m³/j, pendant les mois de septembre et octobre. Ce sont des apports les plus faibles de l'année.

D'après le rapport du PIC, la demande actuelle est déjà de l'ordre de 20.000 m³/j et qu'elle est prévue atteindre 25 000 à 33.000 m³/j en 2025.

Or selon le rapport de la JIRAMA, le système d'AEP d'Antsiranana ne possède que 18 000m³/j de capacité de production destinée mettre à la consommation alors que la demande actuelle dépasserait 20 000 m³/j. C'est la raison pour laquelle la JIRAMA prévoit des besoins de l'ordre de 42.000 m³/j, que ne peut fournir la Besokatra. Elle souhaitera la construction d'une station qui absorbera la quasi-totalité des apports du cours d'eau pendant les mois d'étiage les plus sévères, et qui est équivalent à la moitié de la demande.

Outre cette insuffisance de la fourniture, se profile, également, des problèmes chroniques de pression, qui s'aggravent aux heures de pointe.

Pour assurer la garantie de fourniture d'un débit de 25.000m³/j au système d'AEP d'Antsiranana en 2025, l'étude de la potentialité des ressources en eau disponibles dans les alentours de la ville d'Antsiranana demande des mesures nécessaires à la protection des ressources à exploiter, ainsi que celles permettant d'éviter les conflits avec les autres usagers. Sinon, une nouvelle construction d'AEP sera sollicitée. C'est ce que le projet PIC réalise actuelle dans la ville d'Antsiranana

5. Des hypothèses concluantes

Malgré la réserve inépuisable, le bassin versant du Besokatra n'arrive plus à assurer les demandes de consommations d'eau actuelles vue l'extension de la ville vers le Sud et aussi les exploitations illicites de ressource. La capacité de charge de la rivière de Besokatra est, par la pratique de gestion locale actuelle, insuffisante pour répondre à des multiples besoins en eau accrus.

Ce qui veut dire l'exploitation dudit bassin versant suivait encore la pratique traditionnelle caractérisée par le système à gaspillage d'eau conditionnée par le système de distribution gravitaire. Ensuite, la mise en place des ramifications des barrages traditionnelles augmente le niveau de perte en ressource en eau faute d'organisation appropriée.

Enfin, le lac source alimentant cette rivière se tarisse ce dernier temps, car le débit d'entrée est largement inférieur à celui de sortie. La baisse de la pluviométrie, source du tarissement de la ressource en eau de la rivière de Besokatra, ne préoccupe pas les acteurs or la diminution annuelle

de la fréquence pluviométrique est à l'origine de la baisse tendancielle des volumes d'eau distribuable.

6. Fracturation dans le réservoir et son rôle hydrogéologique

La montagne d'Ambre se compose d'empilements de coulées de basalte de quelques mètres d'épaisseur, séparées par les bases de coulées, qui peuvent se présenter sous forme de brèches et des paléosols. L'ensemble est interstratifié avec des niveaux de scories et parfois des niveaux sédimentaires. Les coulées ont généralement subi une fissuration due au refroidissement lors de la mise en place. Cette stratification dans la formation des basaltes de la montagne d'Ambre introduit une perméabilité dans le plan horizontal.

Le lac Mahasarika et les autres lacs, ainsi que les autres galeries qui se trouvent en amont sont en connexion et contribuent à la ressource en eau de Besokatra. Ces lacs et galeries peuvent être le résultat du volcanisme.

La fracturation qui affecte cette séquence joue donc un rôle capital dans la perméabilité globale du réservoir. Cependant, il est possible de répertorier un certain nombre de facteurs qui interviennent en faveur ou en défaveur de la perméabilité de ce réservoir volcanique.

Elle permet aussi la juxtaposition de strates de perméabilités identiques ou différentes. Les mouvements verticaux entraînent le plus souvent une réouverture des fractures anciennes colmatées.

Par ailleurs, il est fréquent d'observer les effets de l'hydrothermalisme qui est d'autant plus important que la fracture est ancienne et inactivée. Les événements tectoniques qui s'accompagnent de volcanisme provoquent l'injection de produits volcaniques dans les fractures ouvertes (dykes). La perméabilité de la fracture dépendra alors du taux de fissuration par refroidissement de la lave. De même la stabilité de la formation géologique par rapport au niveau de base conduit à une altération importante de la roche, c'est ce que nous avons vu sur terrain.

Donc, le document cartographique obtenu à partir de ces données de fracturation permet ainsi d'orienter la prospection hydrogéologique à plus grande échelle (ex. 1:30 000), et par conséquent, de vérifier la contribution de chaque famille de fractures dans l'hydrodynamique souterraine. Effectivement le rôle hydraulique des fractures est déterminé par la tectonique, les mouvements

verticaux, l'altération et l'hydrothermalisme, autant de facteurs qui ne peuvent être identifiés que par l'étude de terrain.

7. Recommandations émises

Actuellement, la majorité des parties de Montagne d'ambre subit un changement climatique dû à la dégradation de l'environnement. Ce changement a un impact direct sur les écosystèmes divers et surtout sur le régime hydrologique. A vrai dire, le climat actuel a une tendance plus sèche en passant du Nord au Sud, mais il existe des variations locales et certains endroits peuvent présenter des conditions sous-climatiques distinctes. En général, la saison sèche est plus marquée et longue (de mai à novembre) que celle chaude et pluvieuse (de décembre à avril).

Face à ce changement climatique, les autorités locales, les acteurs et les services concernés doivent initier un programme d'adaptation et d'atténuation au changement et à la variabilité climatique car la ressource de montagne d'Ambre qui assurent la survie de beaucoup des gens, devient de plus en plus vulnérable. Les cibles de ce programme toucheront des éléments biologiques et physiques nécessitant une gestion sévère pour assurer leur conservation et une évaluation de leur viabilité. En fait, les habitants, les espèces prioritaires, la fonction écologique, les bassins versants et les paysages exceptionnels identifiés devront être à gérer d'une manière très particulière.

En matière des ressources en eau, un schéma directeur d'aménagement et de gestion intégrée et concertée devrait être élaboré dans les plus brefs délais. Avant toute chose, la région DIANA devrait mobiliser toute catégorie sociale de la population pour faire un reboisement intensif et régulier. De plus, elle devrait l'encourager pour la protection et la restauration des bassins versants. Elle devrait aussi éduquer les usagers pour une gestion rationnelle de l'eau, se concentrer sur la technique d'extension de collecte des eaux de pluies et développer des techniques de stockage d'eau et des infrastructures résistantes au climat. Ceci engendrerait une amélioration de la gestion institutionnelle des ressources en eau. La limite actuelle de l'aire protégée de la Montagne d'Ambre devra être redéfinie pour que le barrage de Besokatra fasse partie intégrante de cette nouvelle aire.

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats obtenus, la mise en œuvre des méthodes suivantes : le SIG, la géologie, la géophysique, la chimie des eaux, les paramètres climatiques et les données bibliographiques, a porté respectivement sur la cartographie des linéaments assimilée aux fractures affectant le substratum, la pétrographie et tectonique, la localisation précise des fractures, la quantité et le renouvellement des eaux souterraines.

Entre autres, ces méthodologies m'ont permis aussi de dégager les conclusions suivantes :

- la présence d'une épaisse couche de roches fissurées (basaltes) permettant l'infiltration ou la circulation des eaux souterraines ;

- l'aquifère en question est en bonne qualité mais quelques fois il y a des zones polluées (à cause de la présence d'une faible teneur en arsenic);

- le substratum rocheux est généralement enfoui sous des altérites épaisses de 10m ou plus, or la cartographie est presque impossible à réaliser à partir d'observation directe de terrain. C'est pourquoi par la géophysique et le SIG, on arrive à déterminer la nature du sous – sol et la localisation des linéaments qui ont une signification hydrogéologique ;

- dans le cas où la pluie annuelle est déficitaire et/ou la saison de pluie est en retard, le débit d'étiage risque de diminuer jusqu'au début du commencement de la saison car les agriculteurs auront naturellement l'intention d'augmenter les débits d'eau dans leurs canaux à moins qu'ils tiennent constant les débits de ces canaux pendant toute l'année.

Bien que, pour l'instant l'eau disponible dans le Bassin de Besokatra est suffisante pour l'alimentation en eau de la ville d'Antsiranana. L'extension de la ville vers le Sud et la culture du khat aux environs du Bassin, jointe aux effets du changement climatique puis la croissance démographique importante dans la ville d'Antsiranana, l'augmentation de la dégradation incontournable de l'environnement ainsi la tendance vers la baisse de la précipitation, les gaspillages au niveau des établissements universitaires et les camps militaires sis dans le bas quartier de Diégo Suarez, actes de vandalismes au niveau de conduite, sont tous des facteurs qui risquent d'induire une diminution inévitable des apports captés au niveau du barrage. Ce qui explique que la protection de ces ressources en appliquant la GIRE s'avère nécessaire afin de

limiter les impacts de ces facteurs cités ci-dessus. Sinon, dans cette situation, le risque de pénurie ou d'insuffisance d'alimentation en eau menace toujours, même les 270 l/s observés en septembre 2014, ne pourraient plus alors être atteints.

Afin de suivre l'exploitation sauvage, la qualité et la quantité des ressources en eau, il faut aussi adopter un texte législatif relatif. A Madagascar, ces lois existent mais elles ne sont ni appliquées ni appropriées à la situation actuelle.

Enfin, la restructuration ou la mise en place à nouveau (avec une Police des Eaux comme ANDEA), devraient effectuer ou envisager afin d'apporter leur appui sur l'élaboration des dispositions de la protection du bassin versant, qu'à leur application et à leur suivi. Des mesures d'adaptation du comportement humain au changement climatique s'avèrent très nécessaire.

Donc quelques soient les milieux, l'eau est une ressource indispensable à la vie et à la fois un bien public, elle mérite d'être bien protégée.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

1. **BESAIRIE H., (1972)**, « Géologie de Madagascar- I, Les terrains sédimentaires », Ann. Géol. Mad. Fasc. N°XXXV, Tananarive, Imprimerie Nationale.
2. **CASTANY G., (1982 : 1998)**. « Principes et méthodes de l'Hydrogéologie ». Dunod, Paris, 236 p.
3. **CASTANY G. et MARGAT J., (1977)**, « Dictionnaire français de l'hydrogéologie », BRGM Orléans, 150p.
4. **CHAPERON P., DANLOUX D., FERRY L., (1993)**, « Fleuves et rivières de Madagascar », 866 p.
5. **COLLINS, FOTZSIMONS, HULSHER, RAZAKAMANANA, (16 Fév 2002)**, “ Structure of the east African orogen in central Madagascar-Precambrian research.”
6. **DANLOUX J. (1983)**, « Crues d'origine cyclonique dans l'Océan Indien (MADAGASCAR) et le Pacifique Sud (NOUVELLE-CALEDONIE et TAHITI) », Publ. n° 140.
7. **DANLOUX J. (1991)**, « Etudes des crues. Les données d'observation et estimation des débits maximum », Rapport scientifique et technique Sciences de la terre Hydrologie n° 1 Madagascar, Centre ORTOM de Nouméa BP A5 Nouméa Cedex Nouvelle Calédonie.154p.
8. **GUY Marquis, EOST Strasbourg (2005)**, « Prospection électrique ».
9. **JIRAMA, (2015)**, « Rapport annuel ».
10. **KASSOU Nadia & Ilias KACIMI, (2009)**, « Géodynamique externe S2, partie II ».
11. **OCOD, (AVRIL 2000)**, «POLITIQUE DE GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU ».
12. **PIC, (2016)**, Rapport d'Avant-Projet Sommaire Complémentaire sur « Les travaux de renforcement et de réhabilitation des systèmes d'alimentation en eau potable de la ville d'Antsiranana ».
13. **Projet WAVES, (2014)**, « Etude de mise en œuvre de l'initiative WAVES dans le haut bassin versant de Besokatra ».
14. **RAKOTONDRAINIBE J. H., (Avril 1982)**, « Les eaux souterraines de Madagascar ».
15. **RAKOTONDRAINIBE J.H. (2006)**, « Synthèse de la géologie et de l'hydrogéologie de Madagascar ».

-
-
16. **RATSARAMODY J., RASIKA M. et RANDRIAZANAMPARANY M. A., (Septembre 2014),** « Contribution au diagnostic technique et proposition d'amélioration de l'adduction d'eau de la ville d'Antsiranana (Madagascar) ».
 17. **Revue HTE N°142 • (Mars - Juin 2009).**
 18. **SNISE, (2015),** Manuel de procédure et de l'organisation du Ministère de l'eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène.

WEBOGRAPHIES

[W1] : <http://ga.water.usgs.gov>

[W2] : <http://www.pseau.org/Madagascar>.

ANNEXE
Tableaux, graphe et photos

I. TABLEAUX

Tableau I : Norme de qualité de l'eau selon OMS

Normes de qualité de l'eau :			
Paramètre	Limite OMS	Effet sanitaire potentiel	Test de qualité
Bactérie (<i>coliformes fécaux / coliformes</i>)	Limite santé : 0 CFU/100ml Risque bas : 1-10 CFU/100ml Risque moyen : 11-100 CFU/100ml Risque élevé : 101-1000 CFU/100ml	<ul style="list-style-type: none"> • Diarrhée, cholera • Typhoïde • Fièvre • Infection de l'intestin (plus grave si non traité) • Déshydratation • Crampes d'estomac • Vomissements 	Obligatoire : Coliformes fécaux Facultatif : Coliformes totaux
Protozoaires (<i>ex : giardia, cryptosporidium</i>)	Les coliformes sont mesurés comme indicateur de contamination microbiologique	<ul style="list-style-type: none"> • Diarrhée, dysenterie • Infection de l'intestin • Fièvre, maux de tête • Déshydratation, crampes d'estomac, nausées • Plus grave si non traité 	Obligatoire : Coliformes fécaux Facultatif : Coliformes totaux
Virus (<i>ex : adénovirus, norovirus</i>)	Les coliformes sont mesurés comme indicateur de contamination microbiologique	<ul style="list-style-type: none"> • Diarrhée • Crampes d'estomac • Fièvre • Maux de têtes • Déshydratation • Vomissement 	Obligatoire : Coliformes fécaux Facultatif : Coliformes totaux
Fer (Fe)	Limite esthétique : 0,3 mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet grave • Effets esthétique inclus : odeur, goût et tâches sur le linge et le riz 	Facultatif
Manganèse (Mn)	Limite santé : 0,4 mg/l Limite esthétique : 0,2 mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes neurologiques si consommation à long terme • Les enfants et bébés sont plus vulnérables (les bébés sont protégé s'ils sont allaités exclusivement) • Effets esthétique : odeur, goût et tâches sur le linge 	Obligatoire (surtout à Tombouctou)
Nitrite (NO₂⁻)	Limite santé (effets long terme) 0,2 mg/l NO ₃ ⁻ Limite santé (effets aigus): 3,0 mg/l NO ₃ ⁻	<p>Effets long terme :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Effets possibles sur le cœur et les poumons, cancers possibles • Diérèse (reins) • Hémorragie de l'estomac <p>Effets graves :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Méthémoglobinémie pour les bébés < 1an • « syndrome du bébé bleu » 	Obligatoire
Conductivité (<i>indicateur de salinité et ions dans l'eau</i>)	Pas de norme fixée Niveaux esthétiques suggérés :	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet grave notifié 	Obligatoire

Tableau II : Stock en fonction du déficit cumulé

0	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
10	90	89	88	88	87	86	86	84	83	82
20	81	81	80	79	78	77	77	76	75	74
30	74	73	72	71	70	70	69	68	68	67
40	66	66	65	64	64	63	62	62	61	60
50	60	59	59	58	58	57	56	56	55	54
60	54	53	53	52	52	51	51	50	50	49
70	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44
80	44	44	43	43	42	42	41	41	40	40
90	40	39	39	38	38	38	37	37	36	36
100	36	35	35	35	34	34	34	33	33	33
110	32	32	32	31	31	31	30	30	30	30
120	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27
130	26	26	26	26	25	25	25	24	24	24
140	24	24	23	23	23	23	22	22	22	22
150	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20
160	19	19	19	19	18	18	18	18	18	18
170	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16
180	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
190	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13
200	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12
210	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
220	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
230	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
240	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
250	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7

260	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6
270	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
280	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
290	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
310	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
320	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
330	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
340	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
360	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
370	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
380	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
390	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
400	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
410	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
420	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
430	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
440	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau III : Les bassins versant de Madagascar (Source : Fleuves et Rivières de Madagascar, Orstom)

Division naturelle des bassins	Superficie totale en km	Substratum	Fleuves et rivières	Observations
Versant Nord-Est et montagne d'Ambre	11200	Terrain volcanique néogène et quaternaire de basalte, sol ferrallitique très perméable	Besokatra et saharena	Bassin allongé et très étroit à très forte pente
Versant de Tsaratanana	20000	Socle granitique et migmatitique sur sol perméable, coulée volcanique à l'est et formation de l'Isalo à l'Ouest	Sambirano et Bemarivo	De forme centrifuge à pente initiale forte et à relief vigoureux
Versant Est	150000 sur 1200 km de long	Sur socle cristallin granitique et migmatitique, roche éruptive basique néogène et quaternaire	Manongory, rianila, Mangoro, Manajary, Mananara	Formant des cuvettes marécageux d'Andilamena et le bassin lacustre d'Alaotra, de forme étroite et très allongée orienté W-E
Le Sud	49000	Sur leptynite,	Mandrare,	En étroite vallée

		<p>cipolin, quartzite, amphibolite, volcanique crétaé.</p> <p>A l'ouest sur le karroo et au sud sur des sols imperméables</p>	<p>Menarandra, Manambovo, Linta</p>	<p>tectonique orienté N-S</p>
Le versant ouest	365000	<p>Leptynite, cipolin, quartzite, micaschiste, gneiss, karroo et formation alluviale dans la partie sédimentaire</p>	<p>Fiherenana, Betsiboka, Tsiribihina, Mangoky</p>	<p>Pente modérée entrecoupée de rapide à forte pente pour les hauts bassins, éxutoirs en deltas avec forte potentialité aquifère pour, l'ensemble</p>

Tableau IV : Récapitulatif des régimes climatiques de Madagascar (Source : Fleuves et Rivières de Madagascar, Orstom)

Région climatique	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Température moyenne/ an (°C)	ETP moyenne par an ETR moyenne par an (mm)	Région concernée
Région perhumide	1500<P<3000 en saison sèche : P>100 par mois	20<T<25 avec forte humidité	900<ETP<1300 ETP=ETR indice d'humidité>100	Versant oriental entre Antalaha et Taolagnaro, Montagne d'Ambre et

				Nosy-Be, bas Sambirano
Région humide et climat d'altitude	1200<P<1500 en saison sèche 10<P<50	10<T<15	800<ETP<1200 ETR=80% ETP Indice d'humidité de 20 à 100	Haute-terre centrale, Mangoro- Alaotra, Isalo et Analavelona, les massifs montagneux
Subhumide à semi -aride	700<P<1500 en saison sèche P<15	T>25	1200<ETP<1800 ETR=50%ETP indice d'humidité : -35à +20	A l'Ouest et au Nord Ouest, bordure orientale des hauts plateaux centraux, bassin sédimentaire de Majunga, région de Diégo, au sud Ouest continental, bassin de Morondava, plateau de Horombe, Isalo et Analavelona
Région sèche	350<P<600 Saison sèche = - 15	20<T<25	1200<ETP<1300 ETR=20%ETP Indice d'humidité=-35	Avancées méridionales du socle, plateau Mahafaly et zone côtière entre

				Morombe et Ambovombe
--	--	--	--	-------------------------

Evaluation de consommations moyenne mensuelle des gros consommateurs parmi les abonnées alimentés à partir d'un seul réservoir d'équilibre de 2.500m³, Quartiers ville basse et zone portiaire

Tableau V : Consomme moyenne mensuel de la ville d'

GROS CONSO- MMATEURS	ZONE PORTIAIRE				VILLE BASSE					TOTAL
	COMADI	BANA	SECREN	PFOI	Hopital Principal	Grand Hotel	2è RFI	Camp Pards	Hotel de la Poste	
CONSOM- MATION. MOYENNE PAR MOIS	1.600	10.000	7.000	18.000	2.000	1.200	18.000	1.900	1.200	60.900
SOUS- TOTAL	36.600				24.300					

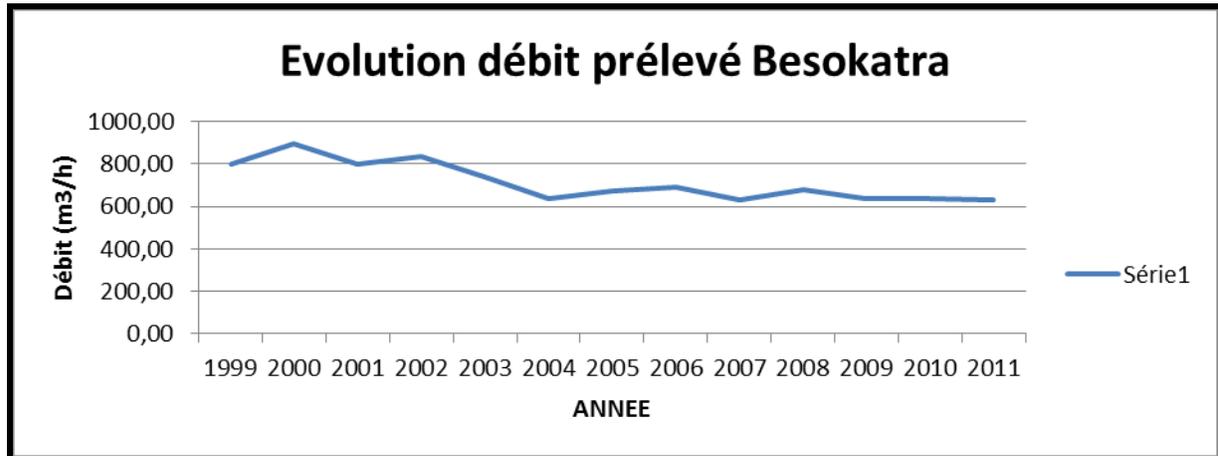
Tableau VI : La demande en eau de la ville d'Antsiranana (Hypothèse tendancielle)

	2008	2009	2010	2015	2020	2025
Population	92 960	104 889	110 134	140 562	166 943	198 276
Total desservie (habitants)	80 980	84 150	87 430	103 830	119 490	132 190
Taux de desserte (%)	87,1%	80,2%	79,4%	73,9%	71,6%	66,7%
Population desservie						
par BP	47 380	63 600	65 080	72 480	79 140	82 840
par BF	33 600	20 550	22 350	31 350	40 350	49 350
Nombre de branchements	6 712	6 802	6 990	7 797	8 531	8 968
Branchements particulier	6 259	6 360	6 508	7 248	7 914	8 284
Bornes fontaines	140	137	149	209	269	329
Autres (cessions, gros abonnés, ...)	313	305	333	340	348	355
Consommations unitaires						
BP (l/j/personne)	140	95	120	120	120	120
BF (l/j/personne)	41	51	42	42	42	42
Habitants par BP	8	10	10	10	10	10
Habitants par BF	240	150	150	150	150	150
Relevé consom.moyenne en m3/j						
Branchements particuliers	6 627	5 964	7 810	8 698	9 497	9 941
Bornes fontaines	1 377	1 055	939	1 317	1 695	2 073
Autres (cessions, gros abonnés, ...)	4 652	5 150	5 215	5 555	5 917	6 302
Total vente.(m3/j)	12 656	12 169	13 964	15 569	17 108	18 316
Population non desservie	11 980	20 739	22 704	36 732	47 453	66 086
Taux (non desservie)	12,9%	19,8%	20,6%	26,1%	28,4%	33,3%
Production de pointe (m3/j)	22 442	18 639	21 120	22 164	24 354	26 073
Production (m3/j)	15 320	15 404	17 455	18 317	20 128	21 548
Rendement global (%)	82,6	79,0	80,0	85,0	85,0	85,0

. Tableau VII : La demande en eau de la ville d'Antsiranana (Hypothèse ODD)

	2008	2009	2010	2015	2020	2025
Population	92 960	104 889	110 134	140 562	166 943	198 276
Total desservie (habitants)	80 980	84 150	89 527	121 726	155 758	198 276
Taux de desserte (%)	87,1%	80,2%	81,3%	86,6%	93,3%	100,0%
Population desservie						
par BP	47 380	63 600	69 070	103 467	132 394	168 535
par BF	33 600	20 550	20 457	18 259	23 364	29 741
Nombre de branchements	6 712	6 802	7 359	10 880	13 881	17 626
Branchements particuliers	6 259	6 360	6 907	10 347	13 239	16 853
Bornes fontaines	140	137	137	166	212	270
Autres (cessions, gros abonnés, ...)	313	305	315	368	429	502
Consommations unitaires						
BP (l/j/personne)	140	95	120	120	120	120
BF (l/j/personne)	41	51	42	42	42	42
Habitants par BP	8	10	10	10	10	10
Habitants par BF	240	150	149	110	110	110
Relevé consom.moyenne en m3/j						
Branchements particuliers	6 627	5 964	8 288	12 416	15 887	20 224
Bornes fontaines	1 377	1 055	859	767	981	1 249
Autres (cessions, gros abonnés, ...)	4 652	5 150	5 215	5 555	5 917	6 302
Total vente.(m3/j)	12 656	12 169	14 363	18 738	22 786	27 776
Population non desservie	11 980	20 739	20 607	18 835	11 185	-
Taux (non desservie)	12,9%	19,8%	18,7%	13,4%	6,7%	0,0%
Production de pointe (m3/j)	22 442	18 639	21 724	26 674	32 436	39 539
Production (m3/j)	15 320	15 404	17 954	22 045	26 806	32 677
Rendement global (%)	82,6	79,0	80,0	85,0	85,0	85,0

II. GRAPHE



III. Photos des sites visités



Photo I : Vue amont des deux prises d'eau de la JIRAMA



Photo II : Passerelle métallique

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE.....	II
ACRONYME.....	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES PHOTOS.....	VII
GLOSSAIRE.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Partie I : GENERALITES.....	4
Chapitre I. <i>CONTEXTE GENERAL</i>	5
I.1. Généralités sur l'eau.....	5
I.1.1. Origine de l'eau.....	5
I.1.2. Cycle de l'eau.....	5
I.2. Les eaux des pluies ou eaux météoriques.....	6
I.3. Les eaux de surface.....	6
I.3.1. Les eaux de fleuves et rivières.....	7
I.3.2. Les lacs, étangs et marais.....	8
I.4. Les eaux souterraines.....	8
I.5. Les ressources en eaux à Madagascar.....	8
I.5.1 Les ressources en eau de surface.....	8
I.5.1.1. Les réseaux hydrographiques.....	8
I.5.1.2. Les lacs.....	9
I.5.2. Contexte hydrographique.....	9
I.5.2.1. Les régimes du Nord.....	9
I.5.2.2. Les régimes du versant Est.....	10

I.5.2.3. Les régimes des hautes terres.....	10
I.5.2.4. Les régimes des pentes occidentales.....	10
I.5.2.5. Les régimes du Sud – Ouest.....	10
I.5.2.6. Les régimes du Sud.....	10
I.5.2.7. Les bassins versants.....	11
I.5.3. Hydrogéologie.....	12
Chapitre II. PROBLEME DES RESSOURCES EN EAU FACE AUX ALEAS.....	15
II.1. Les végétations.....	15
II.2. L’homme.....	15
II.3. Les impacts du changement climatique sur la biosphère et la géosphère.....	15
II.4. Les impacts sur l’accès à la ressource en eau.....	16
II.5. La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE).....	17
II.5.1. Le consensus international sur le GIRE.....	18
Chapitre III. ZONE D’ETUDE.....	19
III.1. Contexte général.....	19
III.1.1. Description de la ville d’Antsiranana I.....	19
III.1.2. Localisation particulière de la Montagne d’Ambre.....	20
III.1.3. Occupation.....	21
III.2. Géomorphologie et climatologie.....	23
III.3. Contexte hydrogéologique.....	25
III.3.1. Hydrographie.....	25
III.3.2. Caractéristiques géométriques du bassin versant de Besokatra.....	25
III.3.3. Hydrologie.....	27
III.4. Cadre géologique.....	27
III.5. Situation de la rivière Besokatra.....	29
III.5.1. Historique.....	29
III.5.2. Captage de Besokatra.....	30
III.5.3. Transfert de l’eau brute.....	32

III.5.4. Caractéristiques des infrastructures.....	33
III.5.4.1. Station de traitement.....	33
III.5.4.2. Réservoirs.....	34
III.5.4.3. Réseau de distribution.....	34
III.5.4.3.1. Description.....	34
III.6. Problème de ressources en eau dans la Montagne d'Ambre.....	35
III.6.1. Dégradation de l'environnement de la Montagne d'Ambre.....	35
III.6.2. Les problématiques du bassin versant de Besokatra.....	35
Partie II : MATERIELS ET METHODES.....	38
I. METHODOLOGIE D'APPROCHES.....	39
1. L'étude hydrogéologique.....	39
2. La géophysique.....	39
3. Le SIG.....	41
3.1. Présentation du logiciel.....	41
3.2. Traitement des cartes.....	43
3.2.1. Technique de géoréférencement.....	43
3.2.2. Technique de vectorisation.....	44
3.2.3. Intégration des points GPS dans le SIG.....	44
4. Calcul du bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite.....	46
4.1. Pourquoi utiliser la méthode de Thornthwaite.....	46
4.2. Principe du bilan hydrologique.....	46
4.3. Méthode de calcul.....	46
II. DONNEES UTILISEES.....	49
Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	51
Chapitre IV. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES QUANTITATIVES...	52
1. Les paramètres climatiques et les projections sur l'évolution du climat de Besokatra pour l'année 2020.....	52
1.1. Température.....	52

1.2. Evolution des températures.....	54
1.3. Précipitation.....	55
1.4. Evolution des précipitations.....	57
1.5. Evapotranspiration.....	58
1.6. Insolation.....	58
2. Résultat de l'étude géophysique.....	59
Chapitre V. ANALYSE ET TRAITEMENT DES RESULTATS QUALITATIFS.....	65
1. Résultat géologique.....	65
1.1. Délimitation des affleurements en surface.....	65
1.2. Tracé des principales fractures.....	66
1.3. Restitution de la carte géologique.....	69
2. Qualités des eaux.....	69
Partie IV : DISCUSSION ET RECOMMANDATION	72
Chapitre VI. EVALUATION DES RESSOURCES DISPONIBLES.....	73
1. Source.....	73
2. Evaluation des eaux de surface.....	73
3. Les potentialités en eau souterraine.....	74
Chapitre VII. BESOINS EN EAU ET LEUR EVOLUTION.....	77
1. Flux interne.....	77
2. Usage externe.....	80
2.1. Utilisation mensuelle.....	80
2.2. Analyse de la demande en eau.....	81
3. Comparaison entre stock et flux.....	84
4. L'estimation des quantités de ressources en eau existante.....	84
5. Hypothèses concluantes.....	85
6. Fracturation dans les réservoirs et son rôle hydrogéologique.....	86
7. Recommandation émise.....	87
CONCLUSION GENERALE.....	88

BIBLIOGRAPHIE..... 91

ANNEXE..... i

RESUME

Titre de mémoire : « ANALYSE DE LA SITUATION DES RESSOURCES EN EAU DE LA PARTIE ORIENTALE DE LA MONTAGNE D'AMBRE – CAS DE LA RIVIERE BESOKATRA »

Nombre de pages : 92

Nombre de figures : 29

Nombre de tableaux : 21

Nombre de photos : 9

RESUME

La présente étude repose sur l'évaluation des ressources en eau disponible dans le Bassin versant de Besokatra (Montagne d'Ambre) basée sur l'analyse quantitative et qualitative permettant d'identifier et de quantifier l'état de ressources actuelles. La méthodologie d'approche (SIG et géophysique) permet de mieux comprendre le contrôle de la tectonique sur l'hydrodynamique souterrain et le réseau hydrographique de cette zone. Sur ce, l'objectif de cette étude est non seulement d'identifier les problèmes de cet aquifère, mais surtout de proposer par la suite des recommandations générales pour protéger et gérer à mieux les ressources en eau.

Mots clés: Hydrogéologie, ressources en eau, bassin versant de Besokatra, tectonique, SIG, géophysique

ABSTRACT

The study present is based on the assessment of available water resources in the Besokatra watershed (mountain of Amber) based on quantitative and qualitative analysis to identity and quantify the current resources status. The approach methodology (GIS and geophysical) allows a better understanding of the control of tectonics on underground hydrodynamics and the hydrographic network of this zone. The objective of this study is not only to identify the problems of this aquifer, but especially to propose general recommendations for the protection and the management of water resources.

Keywords: Hydrogeology, water resources, watershed of Besokatra, tectonic, GIS, geophysical

Auteur : MOANAZAFY Sergénie Ornella

E-mail: msergnieornella@yahoo.fr

Rapporteur: Pr RASOLOMANANA Eddy, Département Mines, ESPA, Université d'Antananarivo