

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO

- 1.1. Delimitation et description
- 1.2. Contexte climatique
- 1.3. Deficit d'ecoulement
- 1.4. Contexte hydrologique
- 1.5. Contexte hydrogeologique
- 1.6. Geologie regionale
- 1.7. Structures et tectonique
- 1.8. Unité morphologique
- 1.9. Occupation du sol

CHAPITRE 2 : ANALYSE HYDROLOGIQUE

- 2.1. Les stations hydrometriques
- 2.2. Jaugeages
- 2.3. Traitement des donnees
- 2.4. Etude de crue
- 2.5. Fonctionnement hydrodynamique et etude de basse eaux

CHAPITRE 3 : LE RISQUE D'INONDATION DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO

- 3.1. Inondation de la plaine d'antanarivo
- 3.2. Zone vulnérable a l'inondation
- 3.3. Solutions et travaux d'aménagements anterieurs
- 3.4. Propositions

CHAPITRE 4: AUTRES PROBLEMES RELATIFS AUX RESSOURCES EN EAUX

- 4.1 La tendance à la penurie d'eaux
- 4.2 La pollution urbaine.

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES ACRONYMES

APIPA :	Autorité pour la protection de plaine d'Antananarivo
BD 500:	Base de donnée à l'échelle 1/500 000
CNRE :	Centre national de recherche sur l'environnement
Cv :	Constante de variation
D :	Déficit de l'écoulement
DC11 :	Débit dépassé 11 mois par an
DC3 :	Débit dépassé 3 mois par an
DC6 :	Débit moyen caractéristique dépassé 6 mois par an
DC9 :	Débit dépassé 9 mois par an
DCE :	Débit caractéristique d'étiage dépassé 355 jours par an
DCI :	Débit dépassé 1 mois par an
DCM :	Débit caractéristique maximum comme étant le débit dépassé 10 jours par an ;
EDF :	Electricité de France
FTM :	Foibe tao-tsaritany Malagasy
H :	Hauteur d'eau
HumR :	Humidité moyenne de l'air
MECIE :	Mise en compatibilité de l'investissement avec l'environnement
NGM:	Niveau générale de la mer
ORSTOM :	Office de recherche scientifique d'outre mer
P :	Précipitation
PK :	Point kilométrique
Q :	Débit d'écoulement

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude	4
Figure 2 : Variation mensuelle de la précipitation moyenne (2004/2005).....	6
Figure 3 : Variation mensuelle de la température moyenne (2000 à 2005)	7
Figure 4 : Variation moyenne mensuelle de l'humidité de l'air (en %) / 2004-2005	7
Figure 5 : Délimitation du Bassin versant supérieur de l'Ikopa contrôlé à Bevomanga	10
Figure 6 : Carte géologique (FTM BD100)	13
Figure 7 Carte structurale d'Antananarivo et ses environs	15
Figure 8 : Pente classée sur le Bassin versant de l'Ikopa.....	17
Figure 9 : Occupation du sol de la plaine d'Antananarivo.....	18
Figure 10 : Courbe de $S_m=f(H)$	23
Figure 11 : Courbes de tarage de l'Ikopa à la station de Bevomanga.....	25
Figure 12 : Courbe des débits classés de l'Ikopa à Bevomanga	32
Figure 13 : Débits moyens mensuels de l'Ikopa à Bevomanga	35
Figure 14 : crues maximales annuelles	36
Figure 15 : Hydrogramme débit / année hydrologique 2004/2005	40
Figure 16 : Carte de risque à l'inondation de la plaine d'Antananarivo	43

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Echelles limnimétriques à la station de Bevomanga.....	20
Photo 2 : Barrage de Tsiazompaniry et de Mantasoa	44
Photo 3 : Résidu du déroctage sur le lit effectué en 1957	45
Photo 4 : Crue dans la ville d'Antananarivo, MIDI Madagascar 26 février 2011	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pluviométrie moyenne mensuelle, (2004/2005).....	5
Tableau 2 : Données hydrologiques de l'Ikopa, mission EDF	21
Tableau 3 : Données hydrologiques de l'Ikopa, ORSTOM	21
Tableau 4 : Jaugeages , APIPA (2001/2010).....	22
Tableau 5 : Barème du jaugeage (2001/2010).....	26
Tableau 6 : Ecart relatifs des débits jaugés et débits calculés.....	27
Tableau 7 : Débits instantanés du 12 janvier 2009	28
Tableau 8 : Débits journaliers / 2004/2005	29
Tableau 9 : Débits journaliers / 2008/2009	30
Tableau 10 : Débits classés 2004/2005.....	31
Tableau 11 : Débits classés 2008/2009.....	31
Tableau 12 : Débits caractéristiques : (2004/2005).....	33
Tableau 13 : Débits moyens mensuels et annuels de la station de Bevomanga	34
Tableau 14 : Crue maximale annuelle	35
Tableau 15 : Caractéristiques des barrages réservoirs en amont	44

INTRODUCTION

L'eau joue deux rôles très importants dans la vie de tous être vivant surtout l'homme. Elle donne la vie mais elle peut tuer en un bref de temps. Essentielle à la vie de presque tout être vivant, l'eau demeure un composant de base incontournable pour le bien être. Le déséquilibre en cette ressource entraîne des dangers humains. Le manque résulte la sécheresse d'où la baisse des produits agro-alimentaire et d'autres problèmes environnementaux. L'abondance peut entraîner d'autres risques comme l'inondation, pour les zones de basse altitude et les dépressions, ou des glissements de terrain pour les zones montagneuses ou collinaires à relief accidenté. Ces sujets sont difficiles à gérer, il faut en toutes possibilités les éviter de s'arriver.

Madagascar est un pays tropical où deux ou trois cyclones y passent chaque année. Il est drainé par plusieurs fleuves et rivières dissymétriques par rapport aux hautes terre, forme causée par le type de relief : longue et calme sur la partie ouest, courte et forte sur la partie Est. L'Ikopa appartient à ces rivières de la partie Est, elle se jette sur le fleuve de Betsiboka à Maevatanana. Son Bassin versant supérieur contrôlé à Bevomanga contient la plaine alluviale d'Antananarivo. Cette plaine, incluant la capitale de la grande Ile, est caractérisée par sa forte vulnérabilité à l'inondation.

Le problème d'inondation d'Antananarivo date du régime d'Andrianampoinimerina qui fit construire les digues pour contenir les crues de l'Ikopa. Il devient une des préoccupations majeures des autorités à chaque saison de pluie. Après une forte précipitation, les bas quartiers de la capitale et la grande plaine alluvionnaire de Betsimitatatra sont exposés à ce risque. Lors d'un passage d'un cyclone les dégâts deviennent catastrophiques. C'est pourquoi des chercheurs s'intéressent sur ce problème depuis des années.

L'inondation est un problème hydrologique dû au déficit de drainage des eaux. Pour la plaine d'Antananarivo le principal problème se base sur la forme du bassin versant et celle de l'exutoire : développé en amont, se rétréci et barré en aval par les rochers de Farahantsana. Le débit qui peut y passer est limité.

Le seuil de Farahantsana conditionne les caractéristiques hydrologiques, hydrogéologiques et géotechniques de la plaine d'Antananarivo et du haut bassin versant de l'Ikopa en général. Il tient un rôle complexe sur la plaine : perturbe le drainage de la plaine en

hautes eaux, maintient les réserves d'eaux souterraines en basse eaux. Ces réserves d'eau assurent à leur tour deux fonctions importantes : principale ressource en eaux utilisée par la population et source d'alimentation des rivières pendant la période de récession.

Avant de passer à tous travaux d'aménagement de la plaine, dans le but de la protection contre l'inondation, des études géophysique, géotechnique, hydrologique et hydrogéologique précises de cette zone doivent être faites afin de savoir les paramètres qui conditionnent toutes solutions possibles.

Cette étude, intitulée “CONTRIBUTION DE L'HYDROLOGIE ET DE LA GEOMORPHOLOGIE A L'ETUDE DU SEUIL DE BEVOMANGA” a pour deux buts principaux :

- de fournir quelques caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques du Haut bassin de l'Ikopa afin de pouvoir normaliser le débit minimal nécessaire pour maintenir l'équilibre hydrogéologique de la plaine et d'évacuer l'excès d'eau en hautes eaux ;

- de proposer des solutions pérennes pour éviter l'inondation de la plaine d'Antananarivo.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1.Délimitation et description

Appartenant à la zone des hautes terres de Madagascar et de la région d'Analamanga, le bassin supérieur de l'Ikopa s'étend sur 8 districts : Antananarivo Renivohitra, Antananarivo Avaradrano, Antananarivo Atsimondrano, Andramasina, Manjakandriana, Arivonimamo, Ambatolampy et Ambohidratrimo. Dans ce bassin, l'Ikopa reçoit l'apport des affluents sur les deux rives gauche et droite. Il est contrôlé par l'exutoire de Bevomanga.

Une unité morphologique très important de ce bassin versant est la plaine d'Antananarivo, nommée plaine de Betsimitatatra. Les caractéristiques de cette plaine affectent l'écoulement à l'exutoire. La plaine d'Antananarivo est une plaine alluviale formée après comblement d'un lac naturel lors d'un fort phénomène de pénéplanation durant plusieurs millions d'années (NOIZET G., 1967). Contenant la capitale de Madagascar, elle se développe sur quatre districts : Antananarivo ville, Antananarivo Avaradrano, Antananarivo Atsimondrano et Ambohidratrimo. Schématiquement, la zone d'étude s'étend approximativement dans un rayon de vingt kilomètres autour de la capitale Antananarivo. Géographiquement, elle est limitée par les coordonnées Laborde, équivalent du Mercator oblique :

- $X_{\min} = 485\ 000\ \text{m}$;
- $X_{\max} = 530\ 000\ \text{m}$;
- $Y_{\min} = 780\ 000\ \text{m}$;
- $Y_{\max} = 820\ 000\ \text{m}$.

La forme de cette plaine est une sorte de vaste cuvette d'environ 30 000 ha d'étendue, entourée par plusieurs collines. Elle est limitée naturellement en aval par le seuil de Bevomanga –Farahantsana. Ce dernier se trouve dans le district d'Ambohidratrimo, dans la commune rurale de Mahitsy. Il est caractérisé par un lit de rivière généralement ondulé et par la présence d'affleurement de granite au environ de Farahantsana. Le seuil de Farahantsana se localise sur les coordonnées selon Laborde Madagascar :

- $X=482\ 756\ \text{m}$
- $Y=814\ 422\ \text{m}$

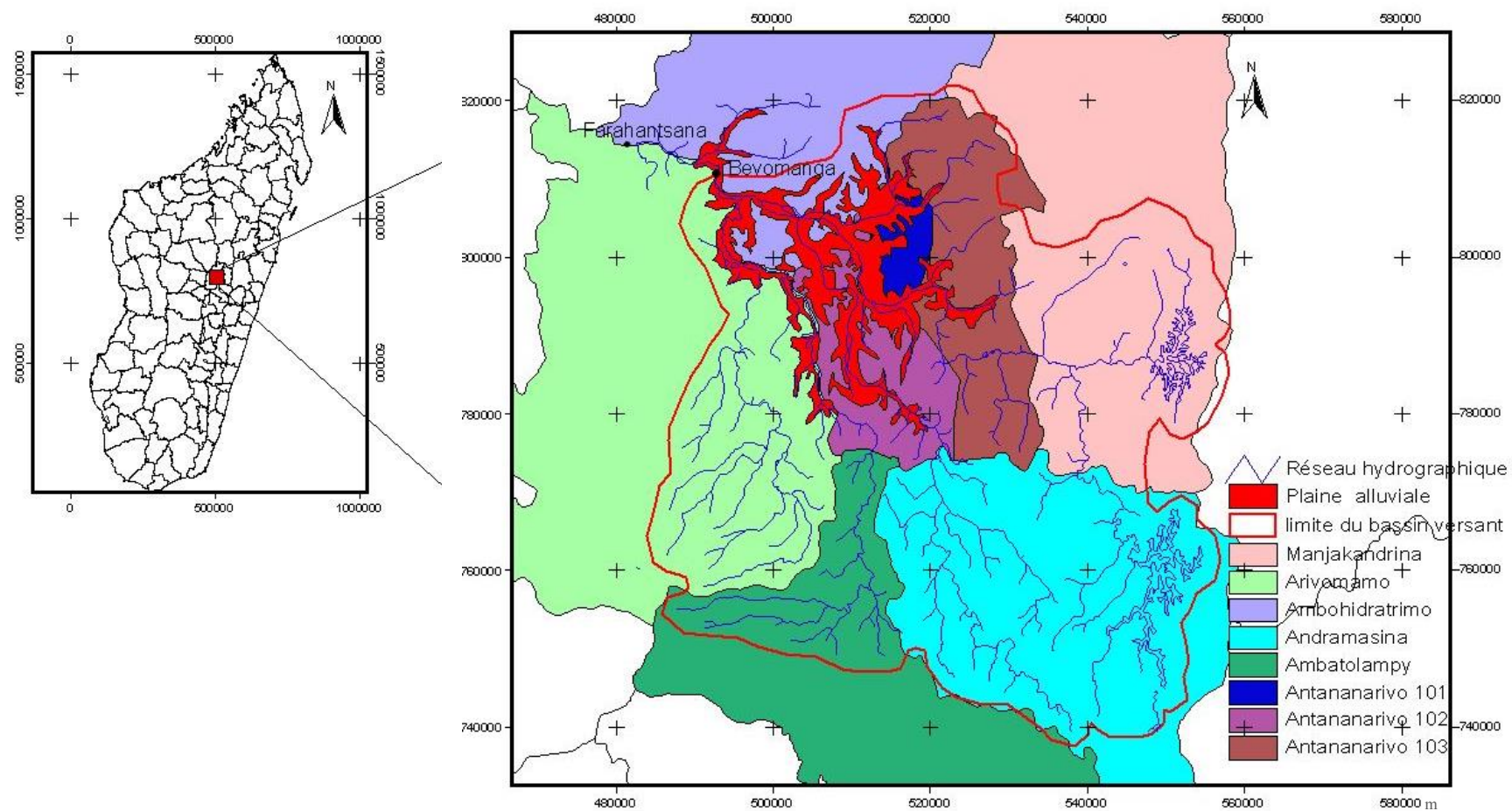


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

1.2. Contexte climatique

L'année hydrologique de Madagascar débute le mois de novembre. Elle est formée par deux saisons bien distinctes : saison de pluie, novembre au mois d'avril, et saison fraîche, du mois de mai au septembre. Ces saisons sont séparées par une intersaison marquée par une humidité très basse de l'air.

- Précipitation :

D'après le classement du régime pluviométrique (*Champoux, Toutant, 1989*), notre zone d'étude appartient à la zone subtropicale humide où la précipitation moyenne est comprise entre 1000 et 1500 mm. Les valeurs moyennes des précipitations mensuelles enregistrées dans les stations pluviométriques aux environs d'Antananarivo sont représentées sur le tableau suivant. La précipitation moyenne est calculée à partir de la moyenne arithmétique.

Station	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct	Total
Imerintsiatosika	148,4	280,5	278,3	267,5	217,9	65,8	17	6,4	0,1	12,1	12,8	42,3	1349,1
Ivato aéroport	177,1	287,1	294,1	258,4	220,5	56	19,3	7,4	9,7	9,2	10,8	63	1412,6
Mahitsy	158,1	294,9	269,3	244,3	250,4	56,1	13,2	4,8	8,8	10,9	10,7	58,7	1380,2
Mandroseza	172,0	280,4	282,2	229,6	199,8	44,8	14,6	6,4	7,8	9,4	10,4	53,4	1310,8
Mantsoa école	149,5	301,5	306	274,3	222,1	58,7	32,2	28,4	38,2	36	21,2	56,9	1525,0
Nanisana	171,0	302,9	294,7	253,4	222,9	47,8	15,4	7,6	8,1	9,1	10,7	53,2	1396,8
Antananarivo obs.	102,7	311,6	278,7	251,4	202,3	61,9	15	8,3	7	10,8	11,9	84,4	1346,0
Ambatobe	178,3	314,1	265,7	240,3	219	46,3	20,6	8,5	13,6	13	10	62,3	1391,7
Ambohidratrimo	138,9	220,9	245,3	189,6	166,3	37,7	10,4	6,9	5,8	7,5	8,4	49,8	1087,5
Ambatofotsy Gare	149,1	264	252,6	204,9	177	54,9	15,1	5,5	8,4	11,8	10,8	51,1	1205,2
Antananarivo Rova	132,3	254,3	295,7	231,8	203,4	55,7	16,4	9,3	6,9	9,1	17,5	43,3	1275,7
Moyenne	152,5	282,9	278,4	240,5	209,2	53,2	17,2	9	10,4	12,6	12,3	56,2	1051,5
Ecart type	22,7	27,8	19,0	25,6	23,2	8,2	5,7	6,6	9,8	7,9	3,7	11,5	
Cv	0,149	0,098	0,068	0,106	0,111	0,155	0,330	0,728	0,939	0,628	0,305	0,205	

Tableau 1 : Pluviométrie moyenne mensuelle des stations aux environs d'Antananarivo en mm (CNRE, 2004/2005)

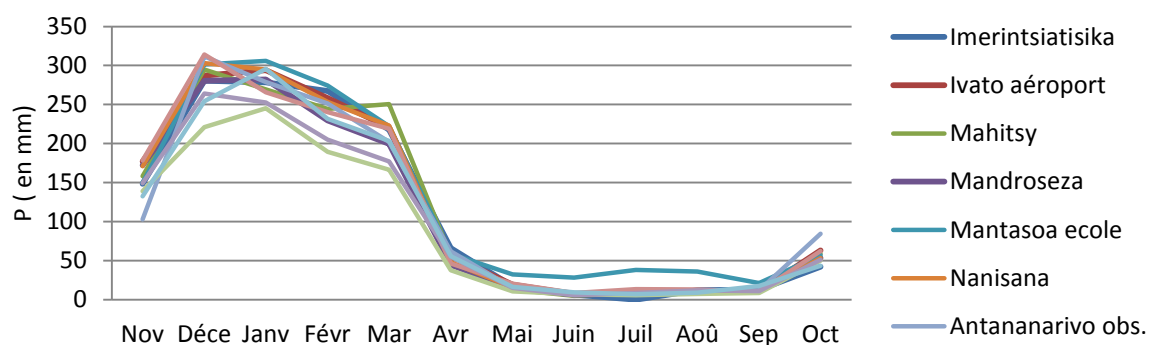


Figure 2 : Variation mensuelle de la précipitation moyenne en mm durant l'année hydrologique 2004/2005.

La précipitation sur notre zone est bien répartie, la variation des précipitations moyennes sur chaque station a la même allure. La précipitation maximale se passe durant le mois de décembre avec une valeur moyenne de 282,9 mm, tandis que la valeur minimale, 9 mm, se produit le mois de juin

– Température :

La température moyenne sur la zone d'étude se situe entre 14,4°C et 22,9°C de 2000 à 2005. Le tableau suivant contient les données des températures sur la plaine d'Antananarivo et ses environs pendant cinq ans 2000 à 2005

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

Tableau 2 : Evolution de la température mensuelle sur la plaine d'Antananarivo et ses environs (°C)

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

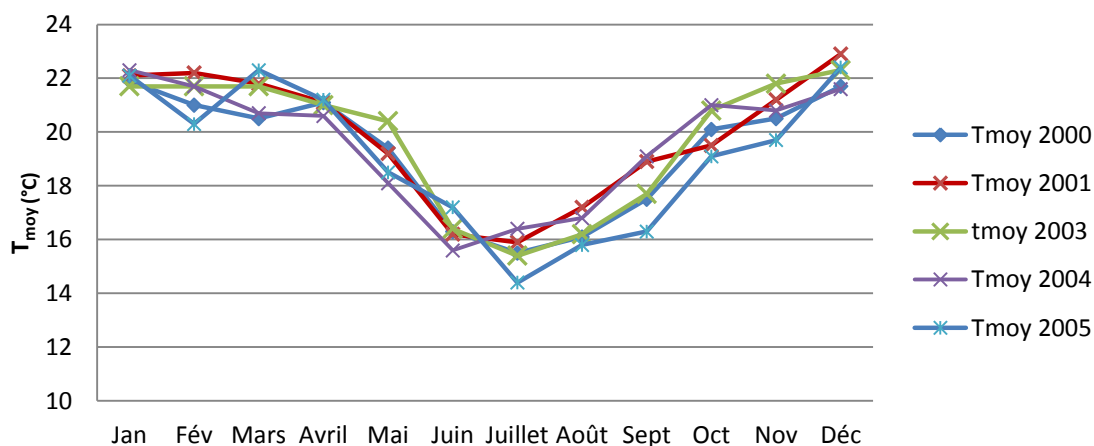


Figure 3 : Variation mensuelle de la température moyenne (2000 à 2005)

Le graphe ci-dessus montre que la plage de variation mensuelle de la température pendant ces 5 ans ne dépasse pas 3°C. La variation annuelle de température entre 2001 et 2005 garde la même allure.

– Humidité de l'air

La valeur de l'humidité de l'air dépend de plusieurs facteurs : humidité relative, vitesse du vent, température. Sa valeur tourne autour 73% en moyenne. Deux pics marquent une année hydrologique : une humidité assez basse (67,5% en Novembre) à cause de l'intersaison et une autre élevée (80% en Février), période pendant laquelle on enregistre une pluviométrie maximale.

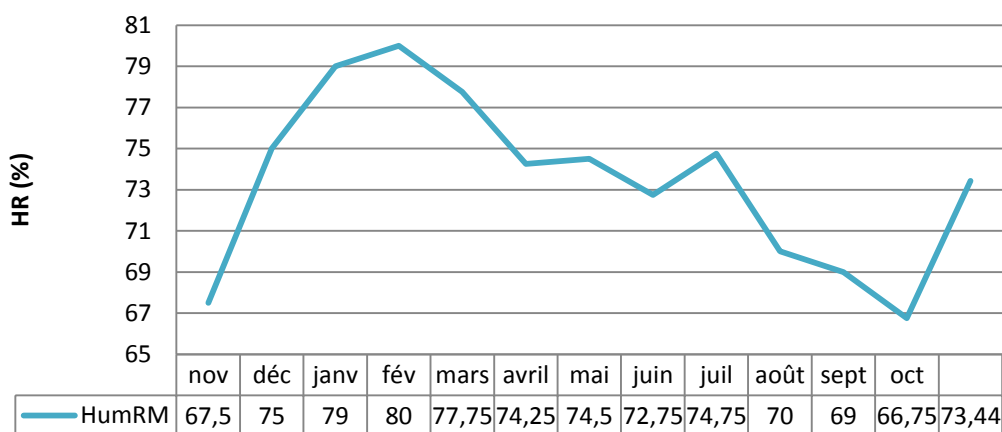


Figure 4 : Variation moyenne mensuelle de l'humidité de l'air (en %) / 2004-2005

1.3.Déficit d'écoulement :

Il représente les pertes d'un bilan hydrologique dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide des mesures ou des méthodes de calcul. A titre illustratif, les formules de Turc et Coutagne sont les plus utilisées. Pour Madagascar celle de Coutagne est la mieux adaptée, pour une condition $1/8m < P < 1/2m$ qui est vérifiée. Elle s'exprime :

$$D = P - m \cdot P^2$$

Où:

- D : déficit d'écoulement [m],
- P : pluie annuelle [m],
- $m = 1 / (0.8 + 0.16 T)$
- T : température moyenne annuelle (°C)

D'après les calculs, pour l'année 2004/2005, la valeur du déficit d'écoulement selon Coutagne est:

$$D = 788,7\text{mm}$$

Avec : $m = 0,21$ et $0,59 < P = 1,051 < 2,35$.

1.4.Contexte hydrologique

Le haut bassin de l'Ikopa est caractérisé par un réseau hydrographique dense et dendritique. La forme dendrite est due à la pente très faible et à la présence de l'alluvion dans l'ensemble. Ce réseau assure le drainage naturel de toute la partie de la plaine et entretient le débit d'écoulement à l'exutoire. En général il est formé par :

- **L'Ikopa** : le principal, traverse la totalité de la plaine, d'Ambohimambola à Bevomanga, et reçoit les apports de ses propres affluents sur les rives gauche et droite juste en amont de l'exutoire;
- **L'affluent de la rive droite** : formé par l'Imamba, de direction Est-Ouest qui draine la partie Nord ;

- **Les affluents de la rive gauche** : drainent la partie Sud et sont formés par l'Andromba grossie de Katsaoka, de direction Sud –Nord, et le Sisaony qui prend source à Andramasina. Ils drainent la partie Sud.

L'Ikopa elle-même est formée par la réunion des deux rivières, Varahina Nord et Varahina Sud, dont les débits sont respectivement entretenus par les deux barrages de retenus de Tsiazompaniry et de Mantasoa.

A partir d'Antelomita, confluence des deux Varahina, l'Ikopa coule sur 30km en direction Ouest avec une pente de 2m/km jusqu'à Ambohimambola. A 10 km en amont d'Ambohimambola la direction devient Sud-Nord. Après Ambohimambola, l'Ikopa entre dans la plaine d'Antananarivo avec un lit endigué sur une distance de 45km jusqu'à Bevomanga. Dans cette partie la pente moyenne est très faible, 25cm/km pouvant atteindre 13cm/km en amont de la confluence avec l'Andromba, zone marécageuse. (Razafimanjato L. 1992)

Sur son passage à Bevomanga, le lit est généralement ondulé et l'Ikopa traverse une série de chute dont la plus importante est celle de Farahantsana, de 3,7m de dénivelée.

Le réseau hydrographique de cette zone est alimenté par les pluies lors de la saison pluvieuse et par les écoulements souterrains à partir des nappes aquifères lors de la période sèche. Le débit de l'Ikopa varie le long de son parcours à cause des apports des affluents et des éventuels débordements et prises d'eau. Il augmente lors des rencontres avec les affluents, puis diminue à cause de la pente faible et la morphologie de l'exutoire. Cet aspect est le principal problème de drainage de la plaine pendant le période de pluie.

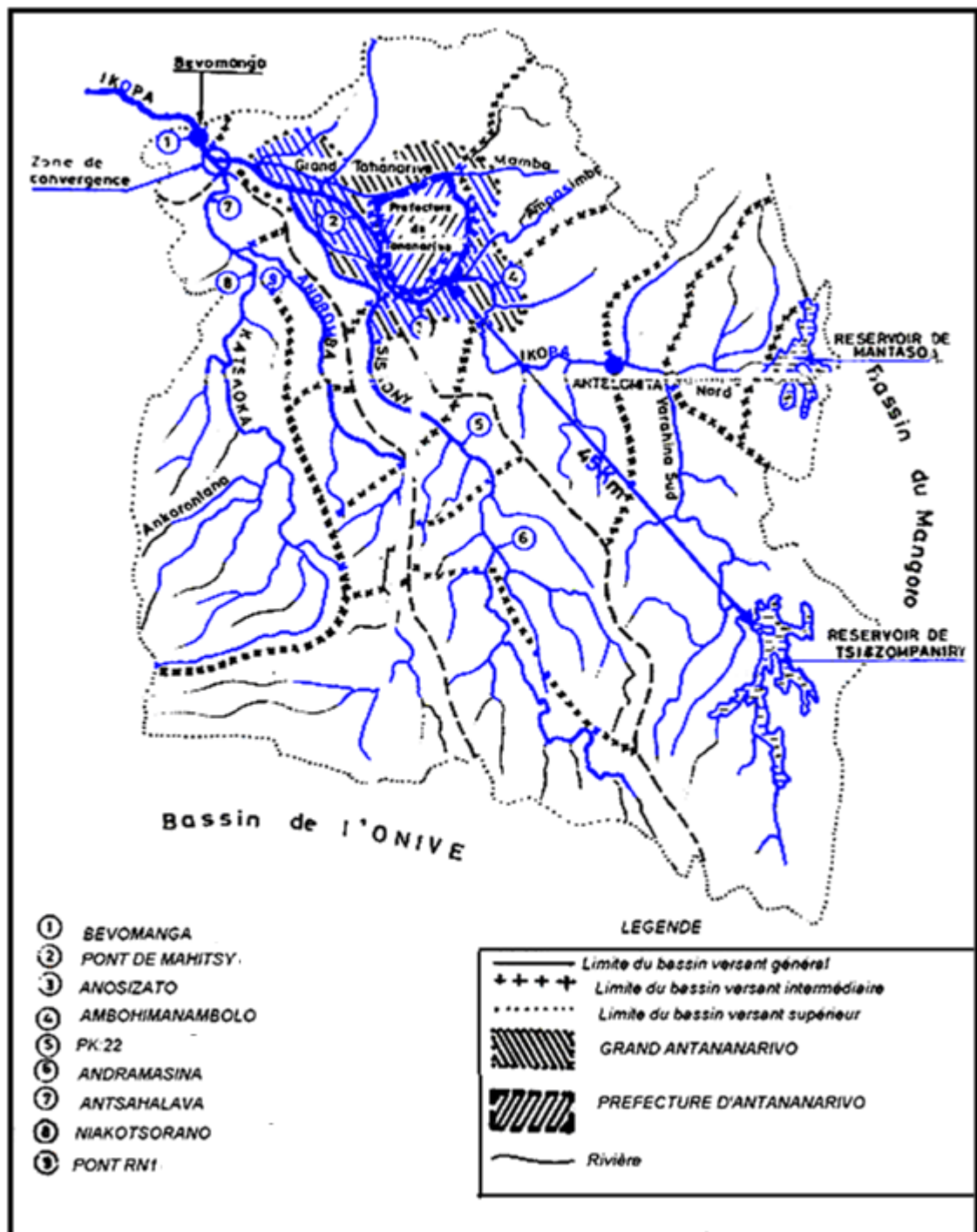


Figure 5 : Délimitation du Bassin versant supérieur de l'Ikopa contrôlé à Bevomanga

1.5.Contexte hydrogéologique

L'alimentation de la nappe alluviale est principalement assurée, en saison sèche, par les cours d'eau. Durant la saison pluvieuse, l'excédent hydrique alimente la nappe par infiltration et drainage latérale. Les exhaures de la nappe sont constituées par les drains et

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

Sur la plaine alluviale d'Antananarivo, il existe quatre types de nappe :

- nappe d'arène : Elle est formée par les arènes qui surmontent partout le socle sain. Elle est semi-captive sous le niveau argilifère au droit des interfluves.

- nappe du socle : C'est une nappe discontinue. Le réservoir est formé par les réseaux de fissures à travers les socles métamorphiques qui sont parfois affleurant à la surface. Elle est alimentée par les couches d'arène qui la surmontent.

- nappe dans les bas-fonds : elle joue le rôle de drain. Les perméabilités horizontales ne sont que de l'ordre de 10^{-5} m/s pour une épaisseur qui ne dépasse pas 1m à 2m.

- nappe alluviale : elle présente des transmissivités le plus souvent comprise entre 3.10^{-3} m²/s et 2.10^{-2} m²/s. Elle est alimentée en permanence par les eaux de surface. Le réservoir est constitué par les alluvions dont le toit est plat avec un gradient de pente moyenne en direction du Nord-Est de l'ordre de 0,40 %. Le mur est situé, par rapport au terrain, entre 20 et 25m dans la majeure partie de la Plaine jusqu'à la latitude Nord d'Ambohimanarina ; environ 8m au niveau de la confluence de l'Ikopa et de la Sisaony et à 0m aux chutes de Farahantsana.

La nappe alluviale est alimentée par trois processus complémentaires :

- Verticalement par l'infiltration directe lors d'une précipitation ou mise en eau des rizières dont l'alimentation est limitée par le ruissellement, l'évapotranspiration et la nature argileuse de la formation affleurant ;
- Par les écoulements souterrains via les réseaux de fracture du socle et les massifs altérés contenant les nappes d'arènes ;
- Verticalement par drainage du réseau hydrographique de surface. Il est contrôlé par la nature du matériau au droit du lit mineur du cours d'eau et est d'autant plus important que ce matériau soit perméable.

1.6. Géologie régionale

Géologiquement, la zone d'étude se trouve sur le socle cristallin du groupe d'Antananarivo. Ce socle est formé par un complexe cristallophyllien. Les roches qui le constituent ont été regroupées en deux ensembles sur la base de critères lithologiques, structuraux et sensibilité à l'altération : les granitoïdes et les orthogneiss. Les orthogneiss sont associés à l'orogénèse Shamwaïenne (2600 MA). La granitisation récente, probablement Pan-Africaine, a individualisé dans la région d'Antananarivo des unités de granitoïdes. Les granites de la

région d'Antananarivo dont la partie orientale fait partie du granite de l'Angavo ont de caractère jeune (Rakotomanana, 1996). Le caractère migmatique du granite de Carion a été confirmé par des études antérieures (Razanatseho, 1998). Un important faisceau de filons de granite dit d'Ambatomiranty est sécant aux formations paragneissiques.

Le plus souvent, le socle ancien n'est pas affleurant, y compris au droit des interfluves où il est présent sous un recouvrement altéritique qui peut atteindre une cinquantaine de mètres d'épaisseur. La succession des faciès d'altération est schématiquement, depuis l'affleurement vers la base :

- un horizon ferrallitique rouge de quelques mètres ;
- des altérites (horizon altéritique kaolinique) qui correspondent à la zone d'argilisation des matériaux altérés,
- des arènes micacées, un matériau arénitique argilo-sableux,
- le socle sain lui-même.

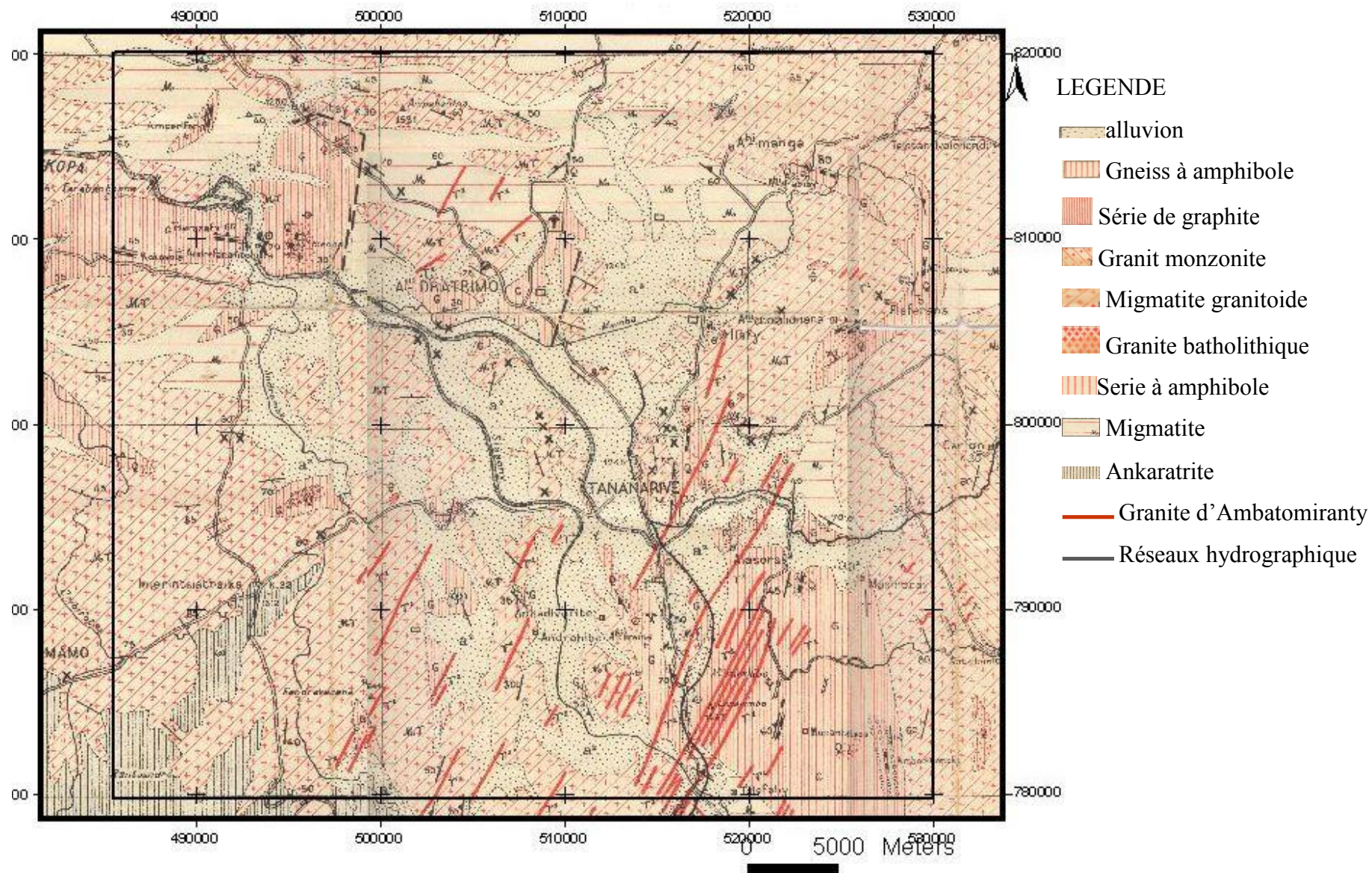


Figure 6 : Carte géologique (FTM BD100)

1.7. Structure et tectonique

Le haut bassin de l'Ikopa se trouve en plein centre du point de virgation de la formation cristalline des Hautes Terres. Cette structure est le résultat d'un charriage à l'état plastique dû à un important événement collisionnel (*Regnault, 1998*).

Au-dessus de la latitude d'Antananarivo, les couches de gneiss, de migmatite et de granite changent brusquement. De l'Ouest à l'Est, elles prennent une direction subméridienne, s'incurvent vers l'Ouest sur une distance de quelques kilomètres et s'orientent franchement d'Est-Ouest. Ce phénomène peut être observé en suivant les directions de la formation paragneissique. Celle de la chaîne de Kotovola-Ambohimanda à la sortie de la plaine adopte une direction Est-Ouest tandis que sur la bordure Est, de Mahazoarivo, Ankatso et Ampasampito, elle suit une direction Nord-Sud.

Au point de vue tectonique, la région est affectée par deux réseaux de failles dont l'un est classé ancien et l'autre récent :

- Le réseau de faille ancien suit une direction subméridienne qui définit les directions de l'Andromba ; de la Sisaony et de l'ensemble de la plaine de Betsimitatatra ;
- Le réseau récent résulte de la vieille fracture lors des dernières activités du volcan de l'Ankaratra au Quaternaire. Cette fracture a une direction N20E. Le réseau est responsable de l'effondrement de la partie Ouest de la plaine, du rehaussement de Farahantsana et de la fracture qui dirige le passage de l'Ikopa au seuil de Bevomanga.

Le MNT suivant montre les variations de l'orientation des reliefs sur le bassin versant. Au niveau de la plaine d'Antananarivo ils changent de direction. Des fractures peuvent être distinguables sur la carte, parfois elles coupent les reliefs avec une longueur plus ou moins long. La géomorphologie du complexe Bevomanga Farahantsana est formée par des collines généralement de direction E-W, coupées par un linéament surélevé de direction subméridien qui est la formation rocheuse affleurant à Farahantsana.

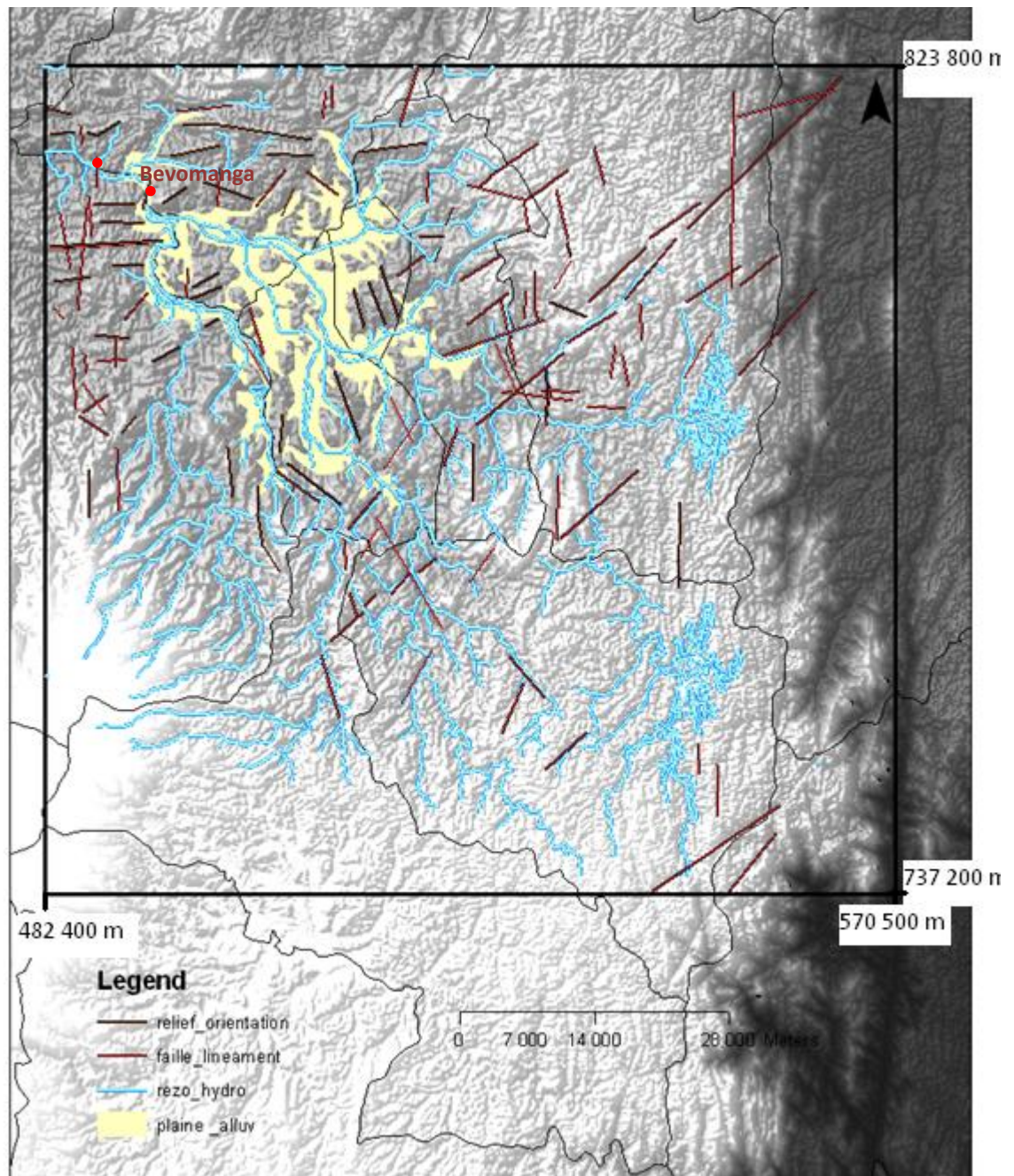


Figure 7 Carte structurale d'Antananarivo et ses environs

1.8. Unité morphologique

La géomorphologie de la zone étudiée résulte d'une combinaison complexe à long terme de trois phénomènes : phénomène tectonique, phénomène de pénéplanation, et phénomène d'alluvionnement. Le paysage est formé par des résidus de collines arrondies et d'une plaine alluviale d'altitude moyenne 1250m.

La plaine alluviale est formée par comblement d'un lac naturel lors des activités tectoniques affectant cette zone. Elle se présente comme une dépression marécageuse et rizicole. Elle couvre

la partie centrale de la zone d'étude sur une surface approximativement 30 000 ha, et est limitée en aval par le seuil de Farahantsana. Sa morphologie est différente entre l'amont et l'aval. En amont, elle s'ouvre très largement en occupant une vaste étendue. En descendant vers l'aval elle se rétrécit rapidement et disparaît pratiquement au niveau de Bevomanga.

Les collines ont parfois la forme arrondie au sommet. De haute ou moyenne altitude, le sommet peut atteindre 1600m. En général, elles se sont présentées comme des reliefs vallonnés qui rappellent le processus de pénéplanation du socle. Elles s'individualisent autour de la plaine alluviale et donnent à la région la forme cuvette qui se ferme dans la partie de Bevomanga.

La carte des pentes classées du bassin versant est donnée sur la figure ci-dessous. Les valeurs des pentes comprises entre 0% et 14% constituent le fond de la carte. Elles représentent les bas fonds et la plaine alluviale d'Antananarivo. D'après cette carte, les collines de ce bassin versant présentent des pentes 20% à 90%. Ces derniers se localisent en général dans la partie amont du bassin versant et subissent des fortes érosions, origine des alluvions de la plaine.

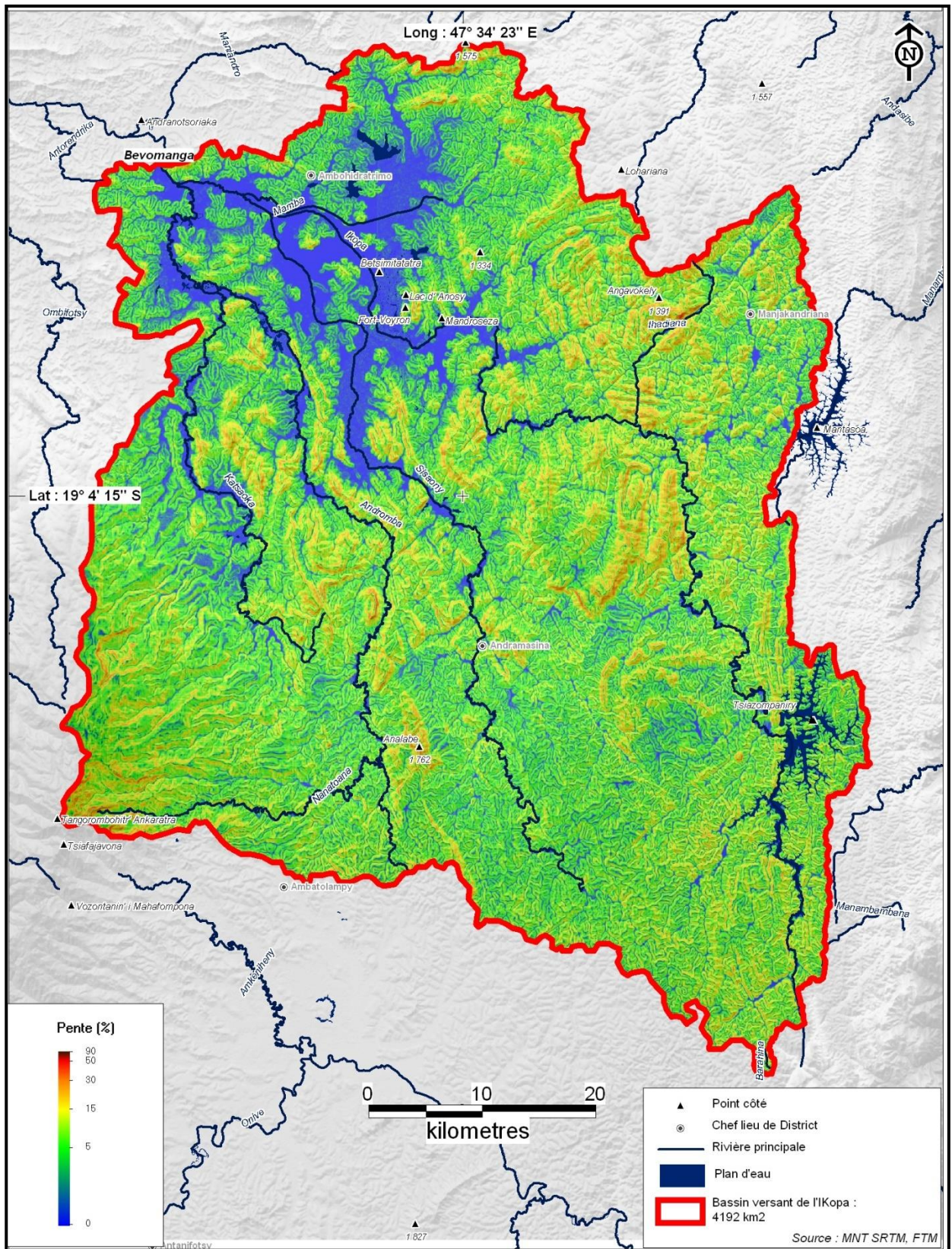


Figure 8 : Pente classée sur le Bassin versant de l'Ikopa

1.9.Occupation du sol

L'occupation du sol représente le paramètre d'interface d'un bassin versant. Concernant la plaine, la principale occupation du sol est la rizière. Aux environs de la plaine et en aval, les collines sont occupées par des zones d'habitation ou presque dénudées. La forêt est absente dans ce secteur, l'occupation du sol n'a pas de grande influence sur les conditions climatologiques de l'ensemble. A l'est, les collines sont boisées d'Eucalyptus (Andramasina et Manjakandriana, Ambohimiadana), et des pins (Ambatolampy). La précipitation y est élevée par rapport à celle du premier secteur. Le fait que la majeure partie du bassin versant est occupée par des savanes ou presque dénudée entretient la dégradation progressive des sols.

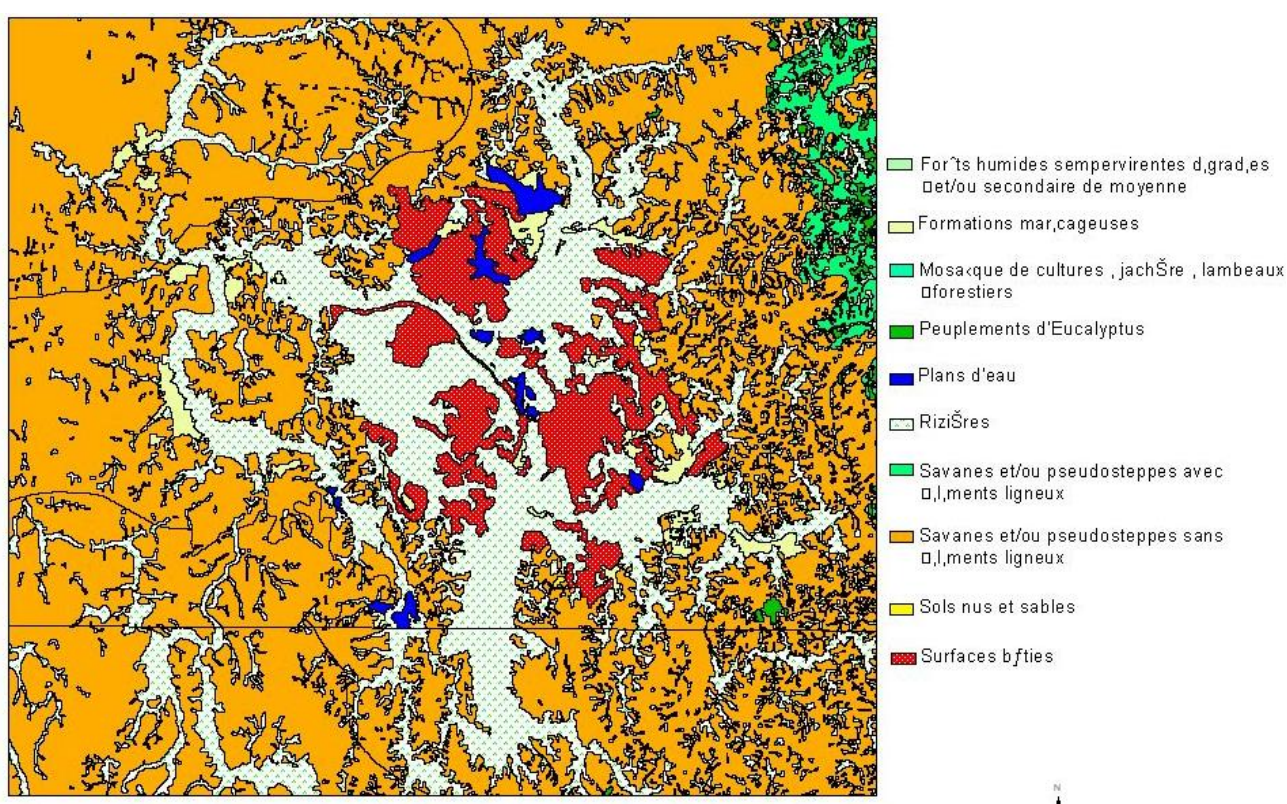


Figure 9 : Occupation du sol de la plaine d'Antananarivo

ANALYSE HYDROLOGIQUE

2.1.Les stations hydrométriques

Le bassin versant supérieur de l'Ikopa est équipé de plusieurs stations hydrométriques.

-Sur l'Ikopa : à Ambohimanambola, Anosizato, pont Mahitsy, Bevomanga et Farahantsana.

- Sur la Sisaony : Station d'Andramasina et station du PK 22
- Sur l'Andromba : station de Tsinjony

Ces stations comportent un ou plusieurs échelle(s) limnimétriques(s) et ou de limnigraphe qui servent à mesurer les hauteurs d'eaux des rivières. Pour l'étude du bassin supérieur de l'Ikopa, la station de Bevomanga a été choisie. Le lit y est généralement rectiligne et l'écoulement y est calme.

La première station de Bevomanga était installée le 20 juin 1948 par le service Provincial des travaux publics en liaison avec la mission EDF, sur la rive droite près du passage de la pirogue de Bevomanga. Les coordonnées géographiques correspondantes sont les suivantes :

- Latitude : 18°48'30''S
- Longitude : 47°19'12''E

L'échelle de Bevomanga contrôle un bassin dont la superficie est égale à 4247km², surface qui tient compte du Bassin situé en amont du barrage de Mantasoa. En saison des pluies, les vannes du barrage de Mantasoa sont généralement fermées et les débits sont évacués vers la Mandraka ou vers la côte Est par le déversoir d'Analavory. Dans ces conditions la surface du bassin se réduit à 4 192 km².

Plusieurs fois, l'échelle de Bevomanga était déplacée ou réinstallée.

- 20 juin 1948 : première installation, zéro de l'échelle à 1243,25m NGM ;
- 28 septembre 1951 : réinstallation, zéro de l'échelle à 1243,05m NGM ;
- 29 mai 1953 : remplacement par l'ORSTOM, zéro calé à la côte 1243,00m NGM ;
- 18 novembre 1959 : déplacement par le service provincial des travaux publics à un zéro égale à 1243,25m NGM

Actuellement elle se trouve au sud du village Andrefambohitra, en amont du passage de pirogue, avec un zéro de l'échelle situé à 1 242,63m, sur les coordonnées géographiques :

- Latitude : 18°48'54,9'' S
- Longitude : 47°19'06,0''E

Elle est équipée d'un capteur d'hauteur d'eau et de deux échelles limnimétriques destinées aux basses eaux et aux hautes eaux.



Photo 1 : Echelles limnimétriques à la station de Bevomanga (respectivement basse eaux et haute eaux)

2.2. Jaugeages

2.2.1. Données existantes

Le jaugeage s'agit d'une opération de terrain d'importance capitale dont la multiplicité et la qualité conditionnent toutes interprétations ultérieures. Jauger un cours d'eau, c'est-à-dire apprécier son débit instantané, consiste en général à estimer la vitesse moyenne à partir des mesures ponctuelles avec un moulinet et à multiplier celle-ci par la section mouillée.

La mission EDF est la première a effectuée des opérations de jaugeage un peu en amont de la station de Bevomanga. Pendant l'année hydrologique 1948-1949, ils ont effectué 8 mesures. Lors de ces opérations le débit maximal mesuré atteignait $231 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau $2,4\text{m}$,

tandis que le débit minimal était de 23,7 m³/s pour une côte 0,14m. Les résultats de ces jaugeages sont représentés sur le tableau suivant.

Date	Côte [m]	Débit [m³/s]
24/08/1949	0,14	23,7
24/08/1948	0,25	31,2
05/07/1948	0,42	41,4
19/01/1948	0,57	49,0
18/04/1949	0,75	64,0
08/03/1949	0,81	69,5
16/02/1949	1,03	88,2
11/03/1949	2,400	231,0

Tableau 2 : Données hydrologiques de l'Ikopa, p7, jaugeage effectués par la mission EDF

Entre 1951 et 1962, l'ORSTOM avait effectué la même opération, sur le même lieu, avec 29 mesures. Les résultats après calage avec l'échelle utilisée par la mission EDF sont les suivants.

Date	Côte [m]	Débit [m³/s]
29/03/1951	1,800	157,000
28/05/1951	0,410	39,600
29/09/1951	0,000	16,300
03/02/1952	3,370	364,000
29/05/1953	0,480	45,200
27/04/1955	0,680	70,000
21/09/1956	0,130	26,000
16/04/1957	1,700	125,000
08/10/1958	0,190	30,000
13/04/1959	2,775	281,000
21/04/1959	2,110	205,000
16/10/1959	0,200	30,700
26/02/1960	0,860	85,000
28/07/1960	0,135	35,600
12/01/1961	3,020	298,000
16/02/1961	0,755	51,000
25/07/1961	0,510	56,000
10/11/1961	0,155	22,700
14/12/1962	1,505	142,000

Tableau 3 : Données hydrologiques de l'Ikopa, p7, jaugeages effectués par l'ORSTOM

Les données de jaugeage récentes disponibles, jugées complètes, de l'Ikopa à Bevomanga sont obtenues en 2005. Par contre En 2007 et 2010 deux jaugeages ont été faite sur la même

station. Elles sont réalisées par l'APIPA en collaboration avec le service de la météorologie et de l'hydrologie à Ampandrianomby.

date	heure début	heure fin	H	S _M	Q	V _{moy}	Pente (%)
11/01/2001	-	-	2,02	-	78,8	-	-
19/01/2001	-	-	3,90	-	286,0	-	-
24/09/2001	-	-	1,41	99,6	23,5	0,236	-
17/11/2001	-	-	1,30	86,5	14,7	0,77	-
29/12/2002	10:30	12:45	2,98	212,3	169,3	0,797	0,02
06/01/2003	10:25	12:20	3,045	208,3	169,5	0,814	0,11
30/05/2003	12:05	13:30	1,59	101,1	54,6	0,457	0,03
10/01/2004	15:30	16:30	2,19	147,0	94,5	0,729	0,04
03/02/2004	12:00	13:00	3,595	252,0	242,0	1	0,04
01/03/2004	15:10	16:00	3,49	237,5	223,5	0,941	0
05/03/2004	14:45	15:20	4,15	285,0	304,0	1,067	0,02
04/03/2005	11:00	11:45	3,76	257,5	254,0	1,023	-
23/02/2005	11:00	11:45	2,82	186,8	151,0	0,81	-
16/02/2005	11:30	12:45	2,395	159,5	116,0	0,727	-
12/02/2005	11:30	12:20	2,96	212,0	180	0,851	-
02/02/2005	11:45	12:30	2,645	174,0	146	0,839	-
12/02/2005	11:30	12:20	2,96	212,0	180,1	0,85	-
16/02/2005	11:30	12:15	2,39	159,5	116	0,73	-
20/02/2005	11:00	11:45	2,82	186,8	151,3	0,81	-
04/03/2005	11:00	11:45	3,76	257,5	254	0,99	-
15/01/2007	16:35	18:25	5,015	490,3	391,5	0,7985	-
16/12/2010	-	-	1,48	98,5	32,4	0,362	-

Tableau 4 : Jaugeages effectués par le service de la météorologie et de l'hydrologie, Ampandrianomby et l'APIPA (2001/2010)

2.2.2. Les courbes de tarage

Les courbes de tarage ou courbes $H=f(Q)$ sont établies à partir des résultats de jaugeage. Pour obtenir une courbe satisfaisante, il faut une quantité suffisante de points ou de couples (H, Q), avec une répartition optimale en hautes et basses eaux. Sachant que les points en hautes eaux sont beaucoup plus difficiles à obtenir pour des raisons techniques, on se pose généralement à un problème d'extrapolation de la courbe. En outre, la qualité de la courbe est liée au caractère plus ou moins stable de la section. Cette stabilité du lit est assurée sur la section de mesure de la station de Bevomanga. Le lit est rectiligne, à fond plat et sablonneux au environ de la station. D'après les résultats du récent jaugeage, la valeur de la pente longitudinale est presque nulle.

On peut assimiler le profil en travers à un rectangle, forme qui est le résultat de l'envasement du lit. Ce type de profil est caractérisé par une allure linéaire de la courbe $S_m=f(H)$, allure vérifiée d'après la figure suivante. La droite de régression linéaire est d'équation

$$S_m = 70,53H - 6,047 \text{ avec } R^2 = 0,993.$$

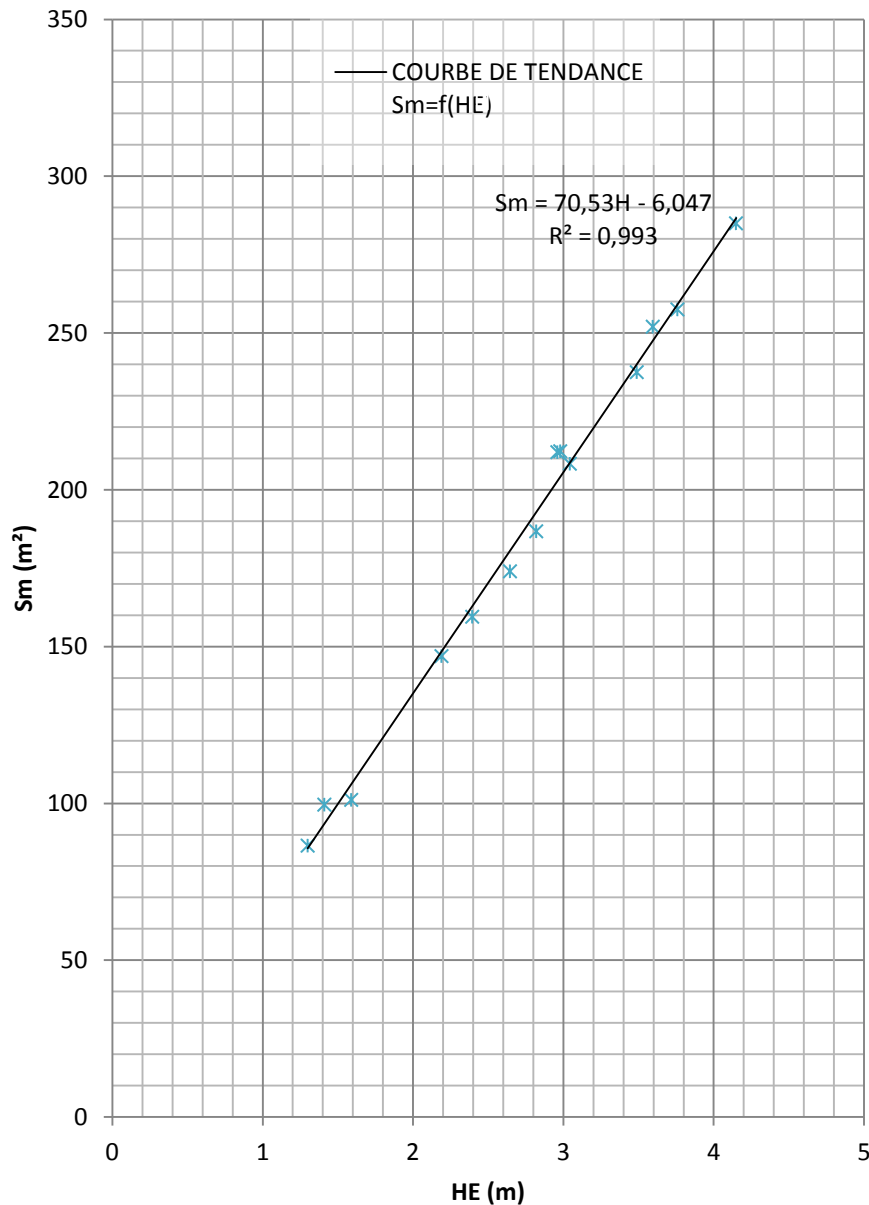


Figure 10 : Courbe de $S_m=f(H)$

Trois courbes ont été successivement établies sur chacune des trois séries de jaugeage citées ci-dessus. Elles sont représentées sur une même figure (figure 11). L'extrapolation est effectuée en utilisant les courbes de tendance de chaque série de mesure. Les tarages des deux anciennes séries de mesure sont presque superposés. Ce fait montre la stabilité du lit pendant cette période de 10 ans.

Cette stabilité est jugée par l'absence des phénomènes pouvant causer des variations de la forme du lit de l'Ikopa et ses affluents. La seule différence entre ces deux premières séries est la dispersion des points par rapport à la courbe de tarage. Cette dispersion peut être due aux erreurs de mesure.

La courbe de tarage des jaugeages faits entre 2001 et 2005 a la même allure que celles des anciens jaugeages. En comparant ces courbes on remarque tout de suite la différence entre le niveau du lit. Le décalage d'échelle est environ 1m. Ce décalage peut être dû au phénomène d'alluvionnement sur lit des rivières pendant 50 ans. Ce phénomène d'alluvionnement est entretenu par l'existence du barrage naturel à Farahantsana, la pente faible du lit et les activités humaines.

En couplant les jaugeages de 2001/2005 avec ceux de 2007 et 2010 l'allure de tarage change. Elle devient presque linéaire. Ce changement de l'allure est causé par l'aménagement ou recalibrage faite sur le lit de l'Ikopa par l'APIPA.

Mathématiquement les courbes de tarage est l'ajustement statistique des couples hauteur-débit de chaque série de jaugeage. Tous les tarages effectués sont des fonctions polynomiales, dont les équations et les coefficients de détermination sont les suivants :

- Jaugeage 1948/1949: $Q = 15,09H^2 + 53,44H + 15,93$
 $R^2 = 0,999$
- jaugeage 1951/1962: $Q = 14,93H^2 + 50,55H + 19,91$
 $R^2 = 0,991$
- jaugeage 2001/2005: $Q = 12,56H^2 + 33,84H - 41,90$
 $R^2 = 0,995$
- jaugeage 2001/2010: $Q = 4,217H^2 + 75,95H - 89,25$
 $R^2 = 0,995$

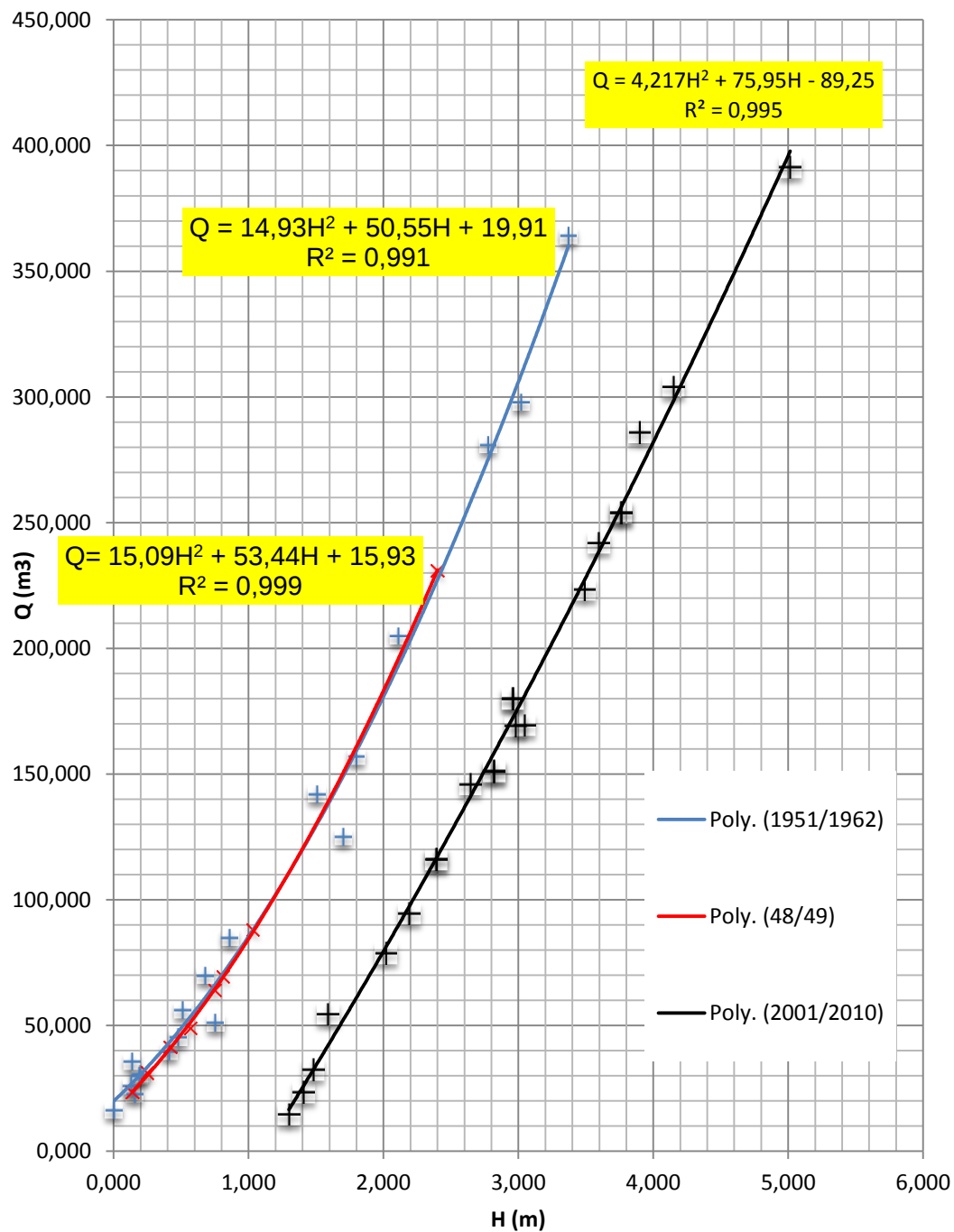


Figure 11 : Courbes de tarage de l'Ikopa à la station de Bevomanga

D'après cette figure, les trois jaugeages sont tous univoques. Ce caractère est dû à la pente faible du lit et la forme régulière de la section mouillée. L'allure de la courbe de tarage récente est presque linéaire. Le coefficient de détermination de la tendance linéaire est de 0,995

2.2.3. Le Barème de jaugeage

Les couples (H, Q) appartenant aux courbes de tarage sont appelées barèmes. Ce sont les données à exploiter. Les barèmes du jaugeage fait entre 2001-2010 sont donnés sur le tableau suivant :

H (m)	Q (m ³ /s)
1,00	-9,08
1,25	12,278
1,50	34,16
1,75	56,58
2,00	79,52
2,25	102,99
2,50	126,98
2,75	151,50
3,00	176,55
3,25	202,13
3,50	228,23
3,75	254,86
4,00	282,02
4,25	309,71
4,50	337,92
4,75	366,66
5,00	395,93
5,25	425,72
5,50	456,04
5,75	486,89
6,00	518,26

Tableau 5 : Barème du jaugeage (station de Bevomanga 2001/2010)

La dispersion des points autour de la courbe de tarage se mesure par D (en %). C'est l'écart-type de m jaugeages à la courbe de tarage (m=21 dans le présent cas). Elle est donnée par la formule :

$$D = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_{\text{jauge}} - Q_{\text{barème}}}{Q_{\text{barème}}} \cdot 100 \right)^2}{m - 2} \right]^{1/2}$$

Le tableau suivant résume les débits jaugés, les débits sur les barèmes correspondants, ainsi que l'écart relatif de ces deux valeurs.

H	Q jaugés	Q barèmes	différence
1,3	14,7	16,61	1,9
1,41	23,5	26,22	2,7
1,48	32,4	32,39	0,0
1,59	54,6	42,17	12,4
2,02	78,8	81,38	2,6
2,19	94,5	97,31	2,8
2,39	116	116,36	0,4
2,395	116	116,84	0,8
2,645	146	141,14	4,9
2,82	151	158,46	7,5
2,82	151,3	158,46	7,2
2,96	180	172,51	7,5
2,96	180,1	172,51	7,6
2,98	169,3	174,53	5,2
3,045	169,5	181,12	11,6
3,49	223,5	227,18	3,7
3,595	242	238,29	3,7
3,76	254	255,94	1,9
3,76	254	255,94	1,9
3,9	286	271,10	14,9
4,15	304	298,57	5,4
5,015	391,5	397,70	6,2

Tableau 6 : Ecart relatifs des débits jaugés et débits calculés

Après les calculs on trouve **D= 2,16%**. Notons que, plus l'écart est petit, plus la courbe ou plutôt le barème paraît satisfaisant et fiable. Une fois encore, en plus de la valeur du coefficient de détermination qui est très proche de 1, la valeur de D vérifie la fiabilité de la courbe de tarage élaborée. Cette courbe est proche de la réalité.

2.3.Traitement des données

L'analyse hydrologique du bassin supérieur de l'Ikopa par un traitement statistique des données permet de trier les caractéristiques de l'Ikopa à l'exutoire au cours de l'année hydrologique. L'interprétation des résultats de ces analyses aboutit à des données utiles pour résoudre la plupart des problèmes hydrologiques des projets d'aménagement.

Les données de base utilisées sont les hauteurs d'eaux instantanées enregistrées sur la station hydrométrique de Bevomanga et la courbe de tarage. Dans le cas de cette étude, Les données utilisées sont celles de 2004/2005. Elles sont données en annexes.

2.3.1. Les débits instantanés

Les débits instantanés ont été calculé à partir de la courbe de tarage et les hauteurs d'eaux enregistrées. Pour la plaine d'Antananarivo, le responsable du recueil des hauteurs d'eaux sur les divers stations hydrométriques est l'APIPA. Elles sont données en annexes. A titre d'exemple les hauteurs d'eau sur la station de Bevomanga au cours du 12 janvier 2009 sont données sur le tableau suivant avec les débits instantanés calculés à partir de la courbe de tarage 2001/2010.

Date et heure	H	Débit calculé
12/01/2009 00:00	2,55	131,84
12/01/2009 01:00	2,53	129,90
12/01/2009 02:00	2,51	127,95
12/01/2009 03:00	2,5	126,98
12/01/2009 04:00	2,48	125,04
12/01/2009 05:00	2,47	124,07
12/01/2009 06:00	2,45	122,14
12/01/2009 07:00	2,44	121,17
12/01/2009 08:00	2,42	119,25
12/01/2009 09:00	2,41	118,28
12/01/2009 10:00	2,4	117,32
12/01/2009 11:00	2,39	116,36
12/01/2009 12:00	2,37	114,44
12/01/2009 16:00	2,34	111,56
12/01/2009 17:00	2,33	110,61
12/01/2009 18:00	2,32	109,65
12/01/2009 19:00	2,31	108,70
12/01/2009 20:00	2,3	107,74
12/01/2009 21:00	2,29	106,79
12/01/2009 22:00	2,28	105,84
12/01/2009 23:00	2,27	104,89

Tableau 7 : Débits instantanés du 12 janvier 2009

D'après ce tableau on constate que le débit de l'Ikopa à la station de Bevomanga varie au cours d'une journée. Avec une moyenne 117,17 et un écart-type égale à 8,463, le coefficient de variation est de 7,2%.

Pour l'année hydrologique 2004/2005, les valeurs extrémales des débits instantanés sont les suivantes :

- Débit minimal, 17,44 m³/s correspond à une hauteur 1,21m, est enregistré le 14 octobre 2005 à 08:00 heure ;

- Débit maximal, 421,10m³/s, correspond à une hauteur d'eau 5,21m³/s, est enregistré le 06 février 2007 à 7:00 heure.

2.3.2. Les débits moyens journaliers et débits caractéristiques

Le débit moyen journalier est calculé à partir des débits instantanés correspondants aux H enregistrées pendant 24 heures. C'est la moyenne de l'intégration des valeurs instantanées. Les débits moyens journaliers pendant l'année hydrologique 2004/2005 et 2008/2009 sont donnés sur les tableaux suivants. Pour l'année hydrologique 2008/2009, on signale que les H du mois d'avril et celles de septembre sont manquantes

	nov.	déc.	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	Sept.	oct.
1	26,961	25,18	178,789	170,752	166,711	109,220	71,056	53,754	42,129	38,647	35,286	28,950
2	28,725	20,84	203,362	135,970	206,921	106,624	66,486	52,183	41,306	37,629	39,313	29,980
3	31,338	19,10	207,082	134,891	248,446	93,693	63,223	50,784	40,668	37,631	40,155	29,293
4	32,644	17,06	201,992	142,140	264,366	82,714	60,005	49,329	34,610	39,159	35,637	30,442
5	30,933	17,22	190,138	152,777	273,360	71,680	58,823	48,478	35,698	38,258	33,197	31,107
6	29,549	17,51	170,458	170,873	288,982	66,859	54,300	48,163	34,519	37,122	33,056	25,525
7	28,690	16,92	143,097	180,274	272,626	63,359	56,796	49,865	34,230	36,349	31,046	23,681
8	28,149	17,78	157,125	171,186	251,765	63,899	56,012	48,447	35,375	34,987	30,876	25,231
9	27,581	17,25	188,400	163,472	232,859	75,846	53,784	47,570	34,966	35,732	29,468	27,473
10	28,209	16,23	219,642	171,529	226,008	83,512	52,472	46,322	33,870	36,831	27,753	29,780
11	28,351	15,04	262,744	175,127	224,765	81,398	50,499	45,793	31,803	37,010	28,671	28,637
12	30,153	14,88	266,271	171,077	230,990	82,939	54,624	45,112	36,085	36,475	28,378	27,215
13	29,981	14,96	244,731	155,379	228,001	85,425	55,559	45,049	37,215	35,610	28,097	23,020
14	33,199	19,92	210,946	142,234	236,014	83,553	55,042	46,008	39,255	36,114	28,378	19,486
15	37,426	21,3	173,959	127,387	227,137	75,119	54,365	46,323	39,582	35,462	28,007	20,657
16	55,236	31,026	141,233	113,071	197,394	71,349	53,624	43,815	38,920	35,727	27,809	21,752
17	51,922	60,182	116,621	104,328	168,947	77,285	54,010	45,796	37,481	37,184	28,637	22,628
18	40,052	104,393	94,646	102,700	150,904	68,361	54,460	48,257	37,303	35,907	28,093	23,099
19	33,292	128,149	79,992	107,150	134,187	61,230	55,301	47,913	36,322	34,756	28,750	22,688
20	27,413	175,704	69,584	108,932	120,968	62,024	54,557	47,944	42,981	32,325	30,011	23,298
21	25,664	204,425	65,707	135,186	110,416	62,090	54,139	46,698	53,946	31,657	29,577	23,743
22	23,903	201,182	66,484	150,264	110,608	71,847	53,047	47,912	49,332	30,962	28,662	22,823
23	23,070	192,083	65,101	155,123	105,181	92,294	51,004	47,665	44,154	31,077	27,723	22,633
24	22,243	181,991	61,318	142,457	97,050	101,233	52,152	44,832	41,459	31,134	26,056	21,311
25	28,811	189,855	61,571	129,225	87,131	93,092	52,987	44,338	41,413	32,005	25,190	21,341
26	54,926	207,186	96,683	123,221	80,048	81,921	60,492	44,337	42,403	31,626	28,464	21,394
27	60,972	206,312	106,37	129,576	75,987	72,195	75,219	44,924	41,854	30,413	29,840	21,174
28	50,201	194,407	136,82	148,860	71,887	73,099	69,902	44,184	40,517	30,011	28,751	19,976
29	37,914	172,487	180,376		67,434	79,661	61,663	42,985	38,347	30,533	28,381	20,577
30	30,300	155,658	212,433		69,323	76,312	57,838	42,771	38,048	32,530	28,151	21,117
31		155,063	205,189		85,442		55,528		35,967	33,613		20,135

Tableau 8 : Débits journaliers (m³/s) - année hydrologique 2004/2005

Jour	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Mai	Juin	Juil.	Aou.	Oct.
1	48,06	84,73	91,42	112,71	115,15	61,10	34,70	34,70	26,95	19,69
2	43,44	68,61	107,35	119,55	118,57	56,42	36,08	36,08	27,86	22,86
3	40,67	66,73	115,63	130,38	112,22	54,56	34,70	34,70	18,79	24,67
4	40,67	63,91	111,73	145,78	102,51	49,91	36,54	36,54	19,69	23,31
5	37,91	76,17	139,30	159,34	101,05	46,21	34,70	34,70	27,40	26,95
6	35,16	61,10	146,28	179,66	97,19	45,28	34,25	34,25	26,49	24,67
7	36,08	59,22	155,81	201,31	84,73	41,59	31,50	31,50	27,40	39,29
8	40,67	54,56	162,37	220,13	72,38	38,83	30,13	30,13	26,49	49,91
9	44,36	51,77	162,37	242,37	63,91	37,91	31,96	31,96	26,95	50,38
10	48,98	72,38	169,46	262,77	59,22	35,16	25,58	25,58	17,89	43,44
11	50,84	77,12	169,97	274,70	66,26	34,25	30,13	30,13	18,79	43,44
12	53,63	62,03	148,28	263,85	81,39	32,42	30,13	30,13	19,24	42,51
13	57,36	61,10	120,53	255,22	104,44	31,50	31,05	31,05	18,34	41,59
14	63,91	58,29	103,47	243,44	117,10	29,68	28,77	28,77	17,44	28,77
15	69,55	54,56	113,68	229,09	125,44	27,86	29,22	29,22	19,24	19,69
16	67,67	54,56	104,93	221,18	129,88	28,77	28,77	29,68	16,53	20,14
17	63,91	44,36	114,17	207,04	136,32	26,95	29,68	29,68	19,69	21,50
18	49,91	36,08	122,00	196,13	146,28	26,95	28,77	28,77	19,69	23,31
19	47,13	29,68	79,01	169,46	86,16	25,13	30,59	35,16	20,14	20,14
20	44,36	26,95	166,42	165,40	126,43	26,04	29,68	29,68	21,05	20,14
21	42,51	24,22	193,03	156,31	118,57	29,68	30,13	30,13	22,86	18,79
22	45,28	21,50	194,58	147,78	117,10	26,04	31,96	31,96	23,77	17,89
23	48,98	26,04	174,55	137,81	65,79	24,22	31,50	31,96	25,58	21,50
24	53,63	32,42	168,95	131,86	64,38	26,95	31,50	31,05	22,86	18,34
25	61,10	36,08	166,42	121,02	109,78	29,68	31,96	31,96	30,13	19,69
26	66,73	41,59	154,80	113,68	104,44	28,77	32,42	31,05	33,79	16,98
27	71,44	45,28	142,78	108,32	120,53	30,13	33,33	31,96	31,50	16,53
28	75,22	49,91	118,08	104,93	120,04	29,68	33,33	32,87	33,33	20,14
29	78,06	57,36	97,68		100,57	36,08	34,25	33,79	27,40	18,79
30	79,96	51,77	82,34		79,49	36,08	31,96	31,05	25,13	18,34
31		66,73	108,81		70,02	34,70		31,96	25,58	
MOYENNE	53,57	52,15	135,68	179,33	100,56	35,11	31,64	31,68	23,81	26,45
ECARTYPE	13,11	16,90	32,52	54,60	24,30	9,83	2,48	2,44	4,87	10,59
CV	0,245	0,324	0,240	0,304	0,242	0,280	0,078	0,077	0,205	0,400

Tableau 9 : Débits journaliers / année hydrologique 2008/2009 ; unité en m³/s

L'étude fréquentielle de ces débits journaliers permet de trouver les différents débits caractéristiques pendant l'année hydrologique. Les classes sont déterminées sur un intervalle d'un pas égal à 20 m³/s. Sur les tableaux 10 et 11 s'affichent les effectifs et fréquences de chaque classe pour les années 2004/2005 et 2008/2009.

Débit classé	Effectif	Fréquence
inférieur ou égal à 20	14	0,038
$20 < Q \leq 40$	136	0,373
$40 < Q \leq 60$	71	0,195
$60 < Q \leq 80$	38	0,104
$80 < Q \leq 100$	16	0,044
$100 < Q \leq 120$	14	0,038
$120 < Q \leq 140$	11	0,030
$140 < Q \leq 160$	14	0,038
$160 < Q \leq 180$	14	0,038
$180 < Q \leq 200$	9	0,025
$200 < Q \leq 220$	12	0,033
$220 < Q \leq 240$	7	0,019
$240 < Q \leq 260$	3	0,008
$260 < Q \leq 280$	5	0,014
$280 < Q \leq 300$	1	0,003
Total	365	1,000

Tableau 10 : Débits classés 2004/2005

classe	effectif	fréquence
inf ou égal à 20	21	0,069
$20 < Q \leq 40$	130	0,428
$40 < Q \leq 60$	42	0,138
$60 < Q \leq 80$	29	0,095
$80 < Q \leq 100$	8	0,026
$100 < Q \leq 120$	26	0,085
$120 < Q \leq 140$	13	0,043
$140 < Q \leq 160$	10	0,033
$160 < Q \leq 180$	11	0,036
$180 < Q \leq 200$	3	0,010
$200 < Q \leq 220$	2	0,007
$220 < Q \leq 240$	3	0,010
$240 < Q \leq 260$	3	0,010
$260 < Q \leq 280$	3	0,010
sup à 280	0	0
Total	304	1

Tableau 11 : Débits classés 2008/2009

La courbe moyenne des fréquences des débits classés (2004/2005) (figure 12) est une fonction polynomiale de degré 4. L'équation est donnée ci-dessous avec un coefficient de détermination $R^2=0,996$ qui est très proche de 1.

$$Q(t) = 2,46 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 3,12 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,014 \cdot t^2 - 2,97 \cdot t + 273,7$$

$$R^2 = 0,996$$

Elle donne le nombre de jours par an au quel un débit est dépassé. Elle permet aussi de rechercher le débit dépassé plus de x fois au cours de l'année. Un exemple de lecture donne : le débit $220 \text{ m}^3/\text{s}$ est dépassé 20 jours par an.

Ce graphe intéresse surtout les utilisateurs d'eau qui ne peuvent effectuer des prélèvements qu'au dessus d'un débit minimal.

La courbe des débits classés correspondante à l'année 2008/2009 présente la même allure que celle de 2004/2005. A la différence de cette dernière elle est marquée par une diminution des débits. Ce fait est expliqué par les valeurs manquantes du mois d'avril et de septembre et par l'augmentation des prises d'eaux en amont.

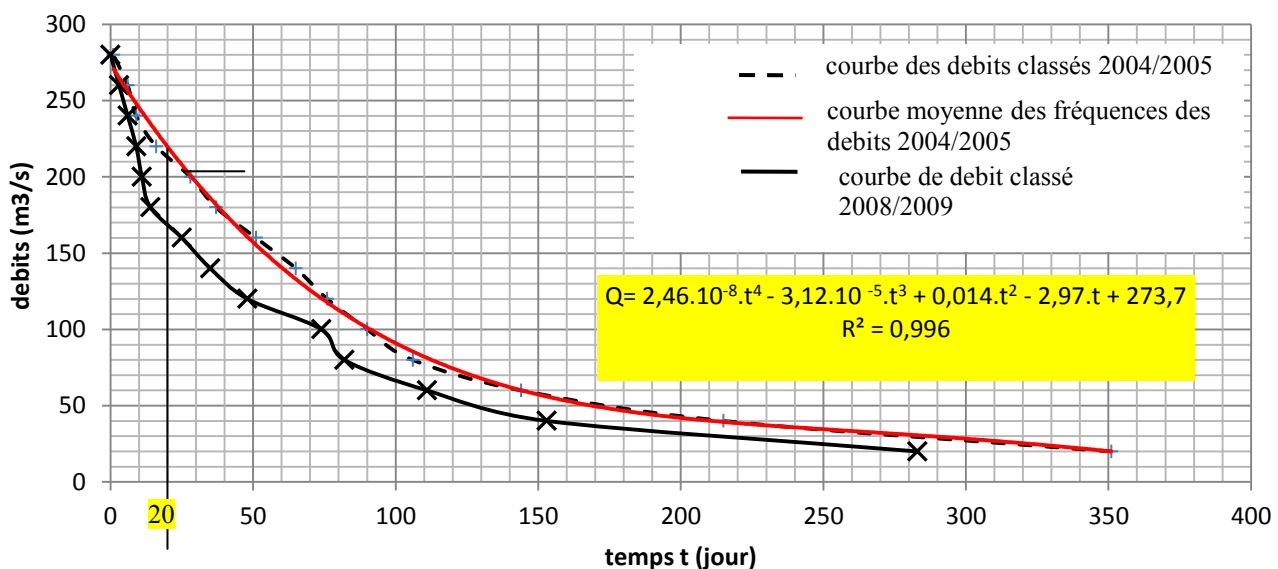


Figure 12 : Courbe des débits classés de l'Ikopa à Bevomanga

A partir de cette courbe, on peut distinguer les points essentiels ou *débits caractéristiques* correspondants à des fréquences remarquables :

- **DCM** : le débit caractéristique maximum comme étant le débit dépassé 10 jours par an ;
- **DC6** : le débit moyen caractéristique dépassé 6 mois par an
- **DCE** : le débit caractéristique d'étiage dépassé 355 jours par an
- **DC1, DC3, DC9 et DC11** : les débits dépassés respectivement 1, 3, 9, et 11 mois par an.

Les valeurs des débits caractéristiques correspondantes à l'année 2004/2005 sont données sur le tableau 12.

Débits caractéristiques	Valeurs (m ³ /s)
DCM	245,40
DC6	45,94
DCE	18,62
DC1	196,63
DC3	101,10
DC9	31,97
DC11	23,24

Tableau 12 : Débits caractéristiques : (2004/2005)

2.3.3. Apport annuel et lame d'eau

L'apport annuel **A** d'un cours d'eau en un point déterminé de son parcours est le volume total d'eau qui passe en ce point pendant une année. C'est la somme des 365 apports journaliers d'une année ou l'aire coiffée par la courbe des débits instantanés relevés pendant une année.

Pour l'année Hydrologique 2004/2005 la valeur de l'apport annuel sur la station de Bevomanga est de :

$$A = 2\,371\,616\,064 \text{ m}^3.$$

Ce volume peut être considéré comme formé par une lame d'eau d'épaisseur **L** ruisselée sur le bassin versant de superficie **K** pendant un an. **L** est appelée indice d'écoulement. Elle est calculée par la formule suivante :

$$L = \frac{A}{K}$$

D'après le calcul on trouve :

$$L = 0,5597 \text{ m ou } 559,7 \text{ mm, avec } K = 4\,237 \text{ km}^2.$$

2.3.4. Coefficient d'écoulement

Le coefficient de l'écoulement est un facteur important en hydrologie. Il permet de connaître le pourcentage de l'eau précipitée qui se transforme en écoulement. Sa variation dans le temps est

analysée selon les conditions hydrologiques et climatiques. Les calculs pour l'année (2004-2005) donnent les valeurs suivantes.

Lame d'eau précipitée : 1051,5 mm
 Lame d'eau écoulée : 559,7 mm
 Coefficient de l'écoulement : 53,2%

2.3.5. Débits moyens mensuels et annuels

Les débits moyens mensuels et annuels sont obtenus à partir de la moyenne arithmétique des débits journaliers. Ils sont donnés sur le tableau suivant pour la période 2000 à 2005.

Bevomanga	2001	2002	2003	2004	2005	moyenne	σ	Cv
Janvier	87,43	45,96	129,51	92,36	149,348	100,91	40,12	0,40
Février	98,46	166,05	137,18	137,38	142,762	136,36	24,29	0,17
Mars	81,45	98,01	185,05	193,17	165,4	144,61	51,44	0,35
Avril	51,93	55,63	84,12	68,14	78,723	67,70	14,01	0,20
Mai	38,77	51,77	55,09	53,00	57,346	51,19	7,26	0,14
Juin	35,41	35,91	48,21	44,99	46,929	42,28	6,16	0,14
Juillet	32,32	29,54	46,48	35,83	39,06	36,64	6,56	0,17
Août	34,56	30,99	32,80	32,45	34,632	33,08	1,53	0,04
Septembre	33,51	30,16	28,78	32,59	30,025	31,01	1,96	0,06
Octobre	31,27	24,79	27,08	22,72	24,185	26,00	3,33	0,12
Novembre	23,32	32,59	29,81	33,64	33,927	30,66	4,41	0,14
Décembre	31,69	86,12	66,84	81,11	136,582	80,46	37,90	0,47
Annuelle	48,34	54,08	82,31	65,06	73,59	64,67	13,87	0,21

Tableau 13 : Débits moyens mensuels et annuels sur la station de Bevomanga (m^3/s)

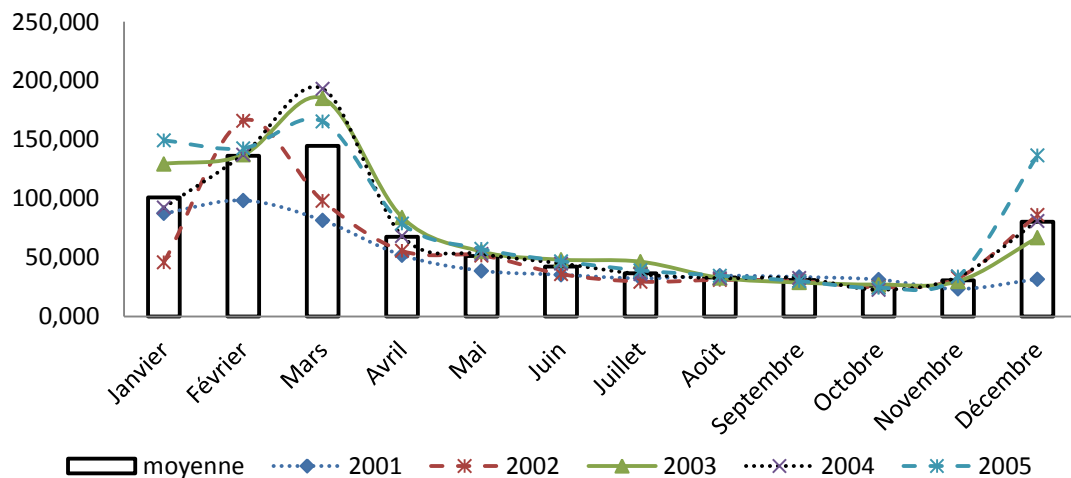


Figure 13 : Débits moyens mensuels de l'Ikopa à Bevomanga

D'après la figure 13 on constate que le mois de mars présente le maximum de débit moyen pour une valeur égale à $144,17 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit le plus bas se trouve au mois d'octobre avec un débit moyen $26,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le module de débit sur 5 ans est de l'ordre de $64,67 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un coefficient de variation égale à 0,21.

2.4. Etude de crue

L'échantillonnage des données est fait par année hydrologique. Ce type d'échantillonnage permet de réduire le nombre de crue à retenir et d'avoir une population homogène. Les résultats sont les suivants.

Année hydrologique	$H_{\max}(\text{m})$	$Q_{\max}(\text{m}^3/\text{s})$	Date et heure
2001/2002	3,79	259,17	14/02/2002
2002/2003	4,59	348,20	22/01/2003
2003/2004	4,12	314,12	05/03/2004 15:00
2004/2005	4,08	308,43	05/03/2005 23:00
2005/2006	3,71	257,88	01/01/2006 15:00
2006/2007	5,21	421,10	06/02/2007 07:00
2007/2008	4,77	369,86	22/02/2008 05:00
2008/2009	3,94	276,92	11/02/2009 07:00
2009/2010	3,7	250,96	03/01/1900 23:33

Tableau 14 : Crues maximales annuelles

D'après ce tableau, la moyenne des crues maximales annuelles est de $311,85 \text{ m}^3/\text{s}$. La loi de distribution statistique qui correspond à cette série de valeur est une loi dissymétrique négative. Le nombre des crues inférieures à la crue moyenne est supérieur au nombre des crues supérieures à celle-ci. La concavité de la courbe est vers les débits croissants.

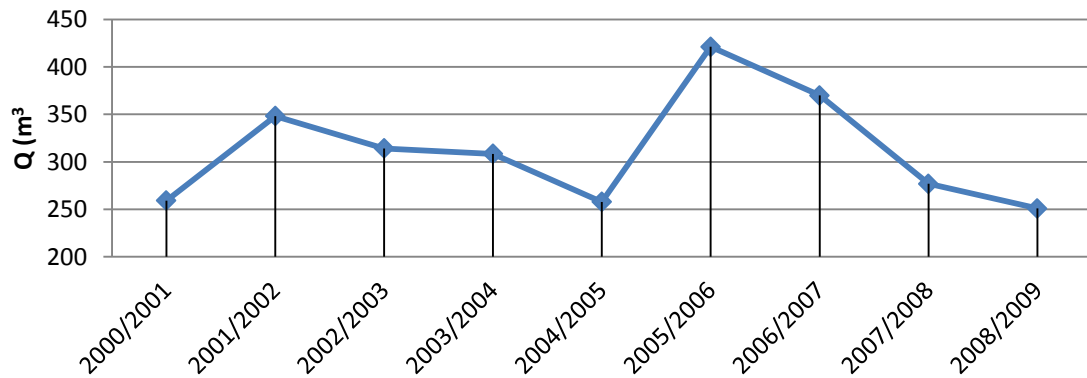


Figure 14 : crues maximales annuelles

Plusieurs lois de distributions statistiques permettent d'estimer les débits de crues décennaux mais ils nécessitent des échantillons supérieurs à 10. Pour le cas contraire on se contente simplement à des évaluations tenant compte de l'information historique. Par faute de donnée, on se contente du débit quinquennal. D'après la courbe précédente sa valeur est de l'ordre de 250 m^3 .

2.5.Fonctionnement hydrodynamique et étude de basse eaux

2.5.1. Structure hydrodynamique de la plaine alluviale

La structure hydrodynamique de l'ensemble du bassin versant étudié a une grande influence sur les écoulements de surface. Les unités morphologiques de la zone d'étude forment deux systèmes. Le sous système non saturé qui se trouve à partir de la surface et le sous système saturé qui forme les nappes aquifères. Les caractéristiques hydrodynamiques de ces deux sous systèmes conditionnent l'écoulement sur l'exutoire lors des périodes de basses eaux ou périodes sèches.

Le sous système non saturé correspond à la zone d'infiltration. Il est caractérisé par son perméabilité qui dépend de plusieurs facteurs : porosité, agissement des grains, granulométrie et forme des grains. Son influence sur l'écoulement de surface dépend de son épaisseur et de la vitesse d'infiltration. Ces deux paramètres définissent le volume d'infiltration. Cette zone se

trouve à partir de la surface jusqu'au niveau statique de la nappe sous-jacente ou la limite supérieure de la zone saturée. En générale, dans ce système l'écoulement est vertical sauf au voisin des cours d'eau où il devient oblique selon les lignes de courant.

Le sous système saturé ou zone noyée correspond à la nappe phréatique. L'importance de ce système c'est qu'il stocke les eaux infiltrées. Sa capacité de stockage dépend du coefficient de tarissement et du volume dynamique. Lors des saisons sèches il alimente les écoulements de surface jusqu'à ce qu'il y a de nouveau des précipitations.

2.5.2. Etude du tarissement

La formulation mathématique retenue pour traduire le tarissement est celle de Maillet (Castany 1967). L'équation se repose sur la schématisation d'un bassin se vidant à travers un bouchon de matériaux poreux sous sa propre charge et admet une décroissance exponentielle des débits en fonction du temps.

$$Q = Q_{RO} e^{-\alpha t}$$

Ce modèle décrit de façon satisfaisante les tarissements avec les notations suivantes :

- Q_{RO} : débit initial au début de tarissement ;
- Q : débit à l'instant t ;
- α : coefficient de tarissement

α correspond à la pente de la courbe de tarissement représentée en coordonnées semi-logarithmiques. Physiquement, il est lié aux pertes de charge subies par l'écoulement de base. Plus sa valeur est faible, plus les réserves dynamiques et permanentes sont importantes. Par conséquent, la valeur faible de α traduit le ralentissement de la vidange des masses d'eau en place dans la zone saturée. α est donné par la formule suivante.

$$\alpha = \frac{\ln Q_2 - \ln Q_1}{t_2 - t_1}$$

où Q_1 et Q_2 sont des débits à des dates t_1 et t_2 aussi éloignées que possible appartenant à la période de tarissement.

D'après le calcul, le coefficient de tarissement est égal à **0,005**, jugé très faible. Physiquement cette valeur faible traduit un tarissement lent, soutenu par d'importantes réserves souterraines. Ces mêmes réserves maintiennent le débit d'étiage en période sèche.

2.5.3. Courbe de décrue ou infiltration

La courbe de décrue ou d'infiltration est toujours décroissante. C'est la portion de la courbe $Q=f(t)$ située à partir du moment de décrue, du débit en pointe de crue (t_0) jusqu'au moment où cesse l'infiltration et commence le tarissement (t_{R0}).

En notant par t_1 la durée de l'infiltration, La vitesse de l'infiltration, notée η , est donnée par :

$$\eta = \frac{1}{t_1} \quad (1)$$

La variation du débit en fonction du temps pendant cette période de décrue peut être représentée par la relation suivante :

$$Q_D(t) = q_{I0} \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (2)$$

Avec :

- η : coefficient de durée ou vitesse d'infiltration, paramètre qui représente la vitesse de l'écoulement (l/j);
- ε : coefficient d'hétérogénéité qui caractérise la concavité de la courbe [T^{-1}]
- q_{I0} : débit d'infiltration en pointe de crue

La valeur de η traduit la vitesse de la décrue. Une valeur élevée de η correspond à un ralentissement de la décrue.

D'après les deux relations (1) et (2), on obtient

$$\varepsilon = \frac{q_{I0} - Q_D(t)}{Q_D(t)} \times \frac{\eta q_{I0}}{Q_D(t)}$$

La valeur de q_{I0} ne peut pas être connue exactement. En effet elle résulte de la différence (au moment de la pointe de crue) entre le débit à l'exutoire et le débit propre de la partie noyée de la plaine. Or ce dernier n'est pas connu. Pour faciliter le calcul elle est estimée égale à la différence entre la valeur du débit au point de crue noté Q_0 et le débit initial en phase de tarissement.

$$q_{I0} = Q_0 - Q_{R0}$$

2.5.4. Volume dynamique et volume d'infiltration

La connaissance de la loi qui décrit le phénomène de tarissement et celui de l'infiltration permet de trouver le volume dynamiques et le volume d'infiltration du système étudié.

Le volume dynamique traduit les réserves d'eau écoulable, c'est-à-dire les réserves utiles contenues dans l'aquifère après infiltration. Cette réserve est à distinguer avec la réserve permanente qui correspond à un volume statique non sollicitable, c'est-à-dire conservé dans la nappe après tarissement. Mathématiquement ce volume se traduit par :

$$V_d = \int_0^{t_f} Q_{RO} e^{-\alpha t} dt$$

Avec :

- t_f : durée du tarissement ;
- Q_{RO} débit initial ou débit de tarissement ;
- α : coefficient de tarissement

Le volume d'infiltration correspond à la capacité de stockage de la zone non saturée. Il peut être calculé par la formule suivante.

$$V_I = \int_0^{t_1} q_{I0} \frac{1-\eta t}{1+\epsilon t} dt$$

2.5.5. Paramètres de récession

Pour l'année hydrologique 2004/2005 la variation temporelle du débit est représentée par la courbe suivante. La courbe des basses eaux est constituée par celles de décrue ou d'infiltration et de tarissement. Pour tous les calculs le temps t est compté à partir du débit en pointe de crue Q_0 , on ne considère pas la courbe des hautes eaux.

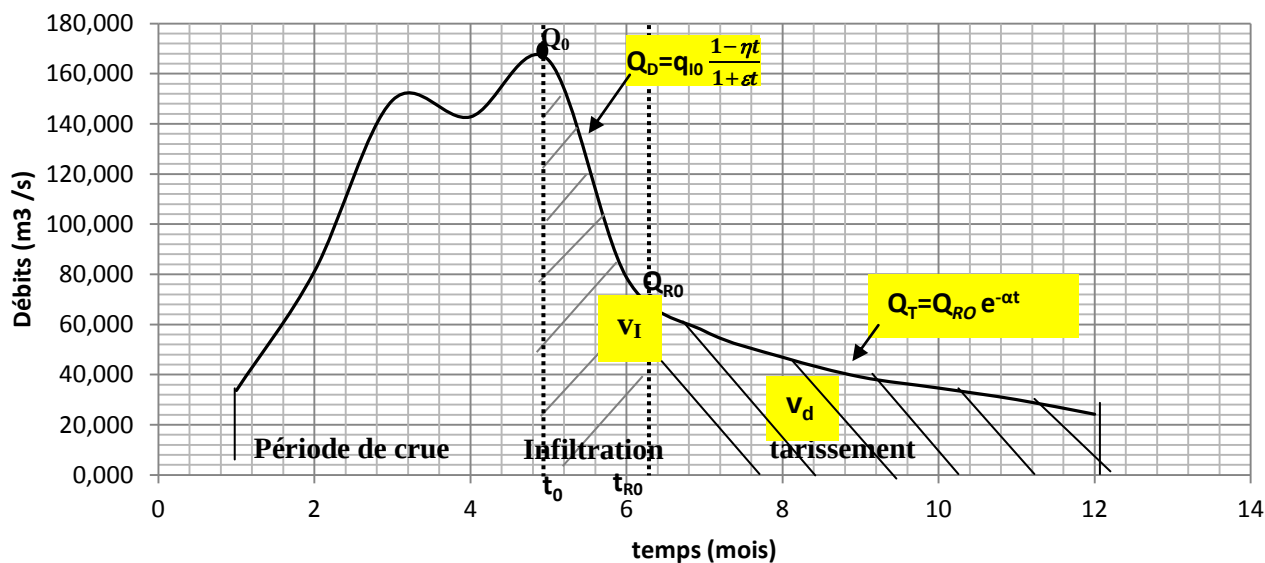


Figure 15 : Hydrogramme débit / année hydrologique 2004/2005

D'après l'analyse de cette courbe et les calculs, les paramètres des basses eaux sont les suivants.

Q_0	: 168 m ³ /s	Débit en pointe de crue
Q_{RO}	: 70 m ³ /s	Débit initial en phase de tarissement
q_{i0}	: 98 m ³ /s	Débit d'infiltration en pointe de crue
t_i	: 42 jours	Durée de l'infiltration
t_f	: 439 jours	Durée du tarissement
η	: 0,024 l/j	Coefficient de durée ou vitesse d'infiltration
α	: 0,005 l/j	Coefficient de tarissement
ε	: 0,09 l/s	Coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement
v_d	: 36 037 m ³	Volume dynamique
v_i	: 10 035 m ³	Volume d'infiltration

LE RISQUE D'INONDATION DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO

L'inondation est un phénomène naturel classé parmi les risques hydrologiques. C'est la submersion de terrain par débordement du réseau hydrographique, par déficit de drainage ou par rupture ou destruction des barrages et/ou endiguement. Grosso modo, elle est causée par la présence excessive de l'eau et le problème de drainage.

3.1.. Inondation de la plaine d'Antananarivo

L'inondation est un risque hydrologique dû à l'abondance de pluie lorsque le drainage devient difficile. C'est le cas de la plaine d'Antananarivo. Les inondations sur la plaine d'Antananarivo durant la saison des pluies sont causées par d'importants flux d'eau en amont mais qui n'ont pas de déversoir en aval.

La morphologie de la plaine d'Antananarivo et les caractéristiques de ses réseaux hydrographiques expliquent la vulnérabilité à l'inondation de la plaine d'Antananarivo.

- **La pente** faible de la partie moyenne et aval du bassin versant de l'Ikopa ne permet pas le bon fonctionnement de l'écoulement. Elle ralentisse les vitesses d'écoulement des rivières et entraîne l'alluvionnement sur les lits des rivières et sur la plaine alluviale.
- **La forme du bassin versant** pose un grand problème de drainage lors des périodes de crues. Il se ferme en aval, juste après la confluence avec les affluents des deux rives, par une gorge étroite et se termine par le barrage rocheux de Farahantsana. Cette forme limite le débit maximal sur l'exutoire.

A part de ces deux facteurs naturels, les activités humaines aggravent la situation. Le remblayage des zones marécageuses devient de plus en plus nombreux pour répondre les besoins en infrastructures. Pourtant ces zones tiennent des rôles très important dans le fonctionnement hydrologique du bassin. Formées par les rizières et les marécages, elles constituent des zones tampons ou bassins de retenue. Elles stockent temporairement les excès d'eau de pluie avant de rejoindre l'Ikopa. A l'absence de ces bassins de retenues l'Ikopa sera débordé très vite en cas de forte pluie et ce sera catastrophique.

Plusieurs inondations sont déjà frappées cette région. Les plus connues et catastrophiques parmi eux sont ceux qui se passaient en 1941 et en 1959 où presque la totalité de la plaine était inondée. A chaque passage de cyclone les dégâts sont nombreux.

3.2. Zone vulnérable à l'inondation

Une partie non négligeable de la plaine présente la vulnérabilité à l'inondation. Une étude antérieure montre les degrés du risque. Le fort risque se trouve dans les abords immédiat de l'Ikopa, sur les bas quartiers de la capitale par faute de problème de drainage, et sur les rizicultures de Betsimitatatra, zone tampon débordée. L'importance de ces zones, du point de vue socio-économique, définit la gravité du risque.

A chaque saison des pluies et à chaque passage des cyclones, la Capitale compte plusieurs sans abris et nombreux dégâts. La croissance démographique, la multiplication des maisons et les remblayages illicites augmentent le risque.

Les quartiers vulnérables de la capitale sont très peuplés. En effet, 1,9% de la population totale de la capitale habitent des Fokontany complètement inondables et 26,3% résident dans des Fokontany dont au moins 75% de la surface est inondable ; (*Institut Pasteur de Madagascar 2001.*). A part les dégâts matériels, le risque sanitaire est un des problèmes causés par l'inondation sur la capitale.

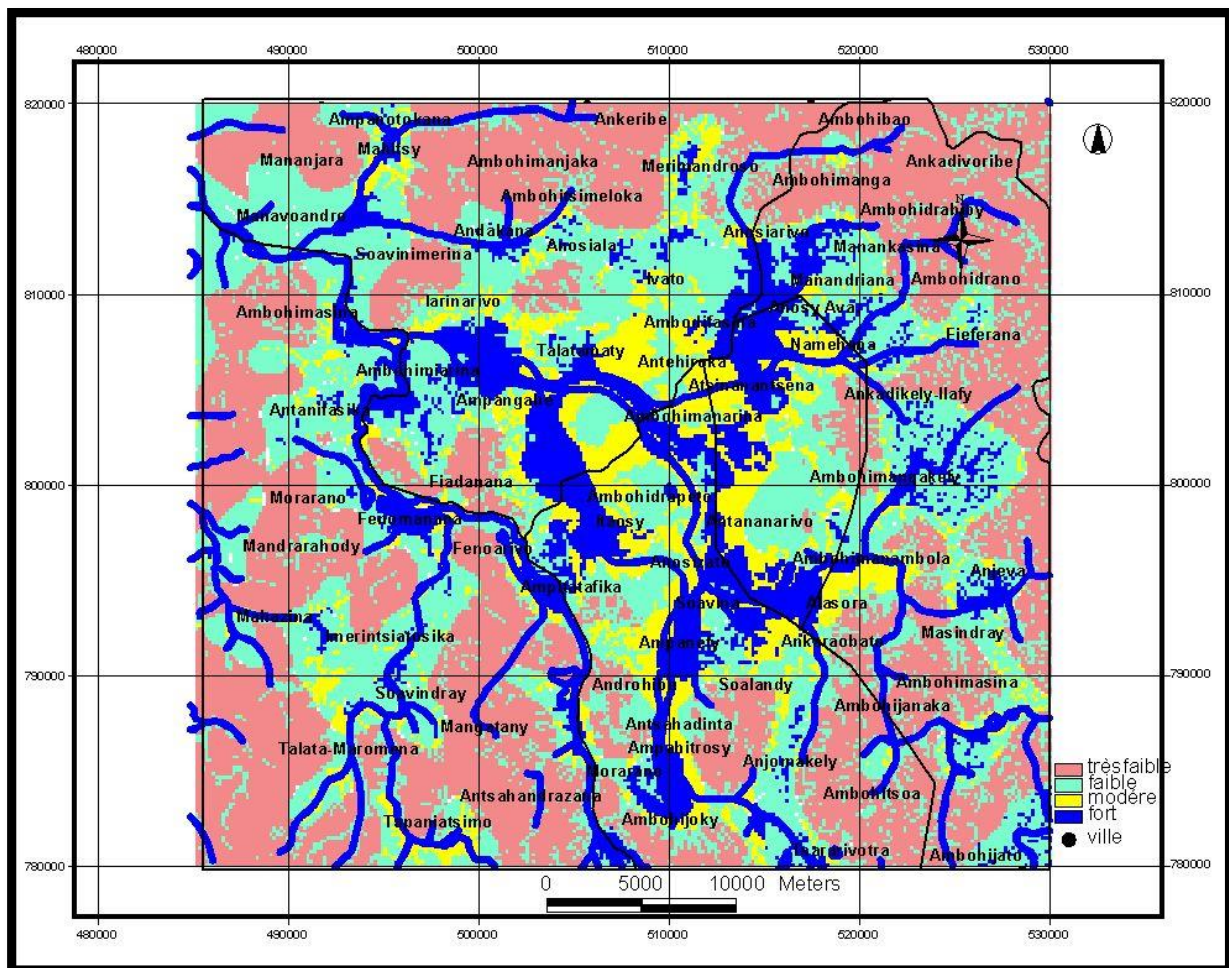


Figure 16 : Carte de risque à l'inondation de la plaine d'Antananarivo

3.3.Solutions et travaux d'aménagements antérieurs

Plusieurs solutions sont déjà avancées pour résoudre le problème, vue la gravité de la situation. La solution consiste à faire des aménagements, en aval ou amont, qui servent à diminuer le débit à l'exutoire pendant les périodes de crue.

3.3.1. Travaux en amont

Les barrages de retenue de Tsiazompaniry et de Mantsoa sont conçus pour régulariser le débit de l'Ikopa. Ces caractéristiques sont données sur le tableau ci dessous. Leur rôle est limité, ils ne concernent que l'Ikopa sans ces affluents des deux rives. Ils ne permettent pas de diminuer le débit à une valeur qui peut affaiblir le risque d'inondation sur la plaine.

Caractéristiques	Mantasoa	Tsiazompaniry
Bassin versant contrôlé	116km ² ,	336km ² .
Capacité du réservoir	72 millions de m ³	223 millions de m ³
Surface maximale inondée	1850 ha	2800 ha
Lâchure et déversement (moyenne annuelle)	1.9 m ³ /s	11.2 m ³ /s
Période de lâchure	août jusqu'à mi-octobre.	juin à octobre

Tableau 15 : caractéristiques des barrages réservoirs en amont



Photo 2 : Barrages de Tsiazompaniry et de Mantasoa

3.3.2. Travaux en aval

Toutes études ayant l'objectif de résoudre le problème d'inondation de la plaine de ce bassin doivent se faire en aval. Le but est de diminuer le niveau des lits majeurs. Plusieurs études y étaient déjà faites.

a) Endiguement de l'Ikopa

Cette lutte contre les inondations se révèle efficace d'une autre façon. Elle permet de sauver la presque totalité des rizières menacées et d'éviter des accidents graves dans les agglomérations de la rive droite. D'autre part, elle aggrave la situation. En période de crue le niveau de l'eau dans les rivières endiguées se trouve au-dessus des niveaux des rizières et de la zone inondable. Si la surélévation des digues est une mesure de prudence, elle augmente la dimension de l'inondation éventuelle lors d'une rupture de digue ou débordement des rivières. Le renforcement des digues est donc à recommander.

b) Déroctage de farahantsana

Pour pouvoir abaisser le niveau des lits majeurs en amont la première solution avancée était le déroctage de Farahantsana.

Les études de l'aménagement de la plaine d'Antananarivo par George NOIZET et ses équipes visaient à dérocter le seuil rocheux de Farahantsana, plus précisément le seuil rocheux au sud du village d'Itendro en amont de Bevomanga. Plusieurs milliers de mètres cubes de matériaux y ont été extrait. Il ne fait qu'alléger le problème. Il est vite apparu qu'un autre seuil existait en aval, seuil actuel de Farahantsana. Une campagne de sondage (*Noizet, 1967*) a montrée que les bedrocks affleurent ou sub-affleurent sur plus de 6km depuis Bevomanga jusqu'au chutes et qu'il se présente à faible profondeurs sur plusieurs km en amont de Bevomanga. En ce moment le déroctage des bedrock perturbant le lit est faisable techniquement mais seul le coût, trop élevé, pose un problème.



Photo 3 : Résidus du déroctage effectué en 1957 au environ de Bevomanga

c) Creusement d'un tunnel

L'étude de la SOGREAH a proposée le creusement d'un tunnel de 7m de diamètre, de 7% de pente et 7,5 km de longueur et 8m de profondeur, qui partirait en amont du seuil de Bevomanga et aboutirait dans un affluent rive gauche de l'Ikopa. La réalisation de ce projet demandera de nombreuses études précises, notamment une étude géophysique qui déterminera dans les zones marécageuses des confluent la profondeur du bedrock.

d) Recalibrage du lit de l'Ikopa

C'est la solution entreprise par l'APIPA actuellement. Elle a pour but d'augmenter la surface mouillée lors de la saison de pluie et l'alléger le phénomène d'alluvionnement sur le lit de l'Ikopa. Il est déjà lancé en 2009. Il constitue une solution pérenne. Le tronçon crucial se trouve entre le barrage de Tanjombato et le pont d'Anosizato. Elle ne réduit qu'en quelque cm le niveau de l'Ikopa en aval pendant les saisons de pluies. Cette solution ne fait qu'alléger le risque.

e) Canal de dérivation

Une visite du site en 1999, effectuée par l'APIPA avec une équipe de techniciens : ex-BPPA, a permis de relever la possibilité d'augmenter le débit pendant la période de crues. Il consiste à aménager sur la rive droite un canal de dérivation, bétonné ou en pierre maçonné pour éviter l'effet érosif de l'eau.

3.4.. Proposition

La meilleure solution consiste à augmenter le débit de l'écoulement à l'exutoire de ce bassin versant en tenant compte les débits d'étiages durant l'année hydrologique, l'équilibre hydrogéologique en amont et l'écosystème en aval

Deux façons peuvent résoudre le problème. Le premier choix consiste à dévier une partie de l'apport de l'Ikopa en prêtant un nouveau lit qui part juste après la zone de confluence avec les affluents des deux rives et regagne l'Ikopa en aval de Farahantsana. Le second vise à aménager un barrage artificiel à Farahantsana pour pouvoir régulariser le débit de l'Ikopa par rapport à la hauteur d'eau en amont.

Le choix dépend du coût du projet, leurs impacts sur l'environnement en amont et en aval et leur faisabilité technique

3.4.1. L'équilibre hydrologique en amont :

Le fonctionnement hydrogéologique et la stabilité des terrains sur la plaine d'Antananarivo sont maintenus par le barrage rocheux de Farahantsana. La nappe alluviale est barrée par ce dernier. Le niveau piézométrique de cette nappe en amont et la stabilité des terrains sur la plaine dépendent du niveau de Farahantsana. Si ce dernier viendrait de disparaître, la nappe irait se vider et delà, les dégâts seraient incalculables.

- Il y a formation des vides, lieux anciennement occupés par de l'eau souterraine. Les diverses grandes infrastructures d'Antananarivo, bâtis sur la partie remblayée de la plaine, résultent la possibilité de l'affaissement de terrain.
- Les plans d'eaux et les rizières, principalement composés de tourbe, vont s'assécher. A part la sécheresse qui est un grand problème sur l'agriculture, le danger présenté par le tourbe déshydraté et combustible est aussi inquiétant.

Pour les deux solutions avancées, le problème de vidange de la nappe alluvionnaire pendant la période d'étiage est toujours inquiétante et doit être prise en compte. Si le débit en aval augmente, la hauteur d'eau des rivières en amont va diminuer, la nappe en amont se tarit jusqu'à avoir l'équilibre hydrologique. Pour le résoudre, il faut implanter ou aménager des vannes sur l'Ikopa en aval. Elles, permettent de régulariser le débit à l'exutoire en fonction de la hauteur d'eaux en amont.

3.4.2. Aménagement de barrage à Farahantsana

C'est l'idée la plus simple pour résoudre l'inondation de la plaine d'Antananarivo. Il consiste à remplacer le barrage rocheux naturel par un barrage artificiel équipé d'une vanne ; de manière à pouvoir contrôler les hauteurs d'eau sur la plaine. Pendant les saisons d'étiage les vannes sont fermées pour éviter le tarissement total de la nappe aquifère et l'assèchement des plans d'eau en amont. En saison de pluie les vannes sont ouvertes pour évacuer les excès hydriques des réseaux hydrographiques en amont. L'hauteur d'eau de référence est prise sur les zones les plus vulnérables, comme sur le pont d'Anosizato ou sur le pont d'Ampitatafika.

Lors de l'étude de Noizet aux années soixante, ce déroctage de Farahantsana ne pose aucun problème sur l'environnement parce qu'à ce temps là la grande partie de la plaine joue encore le rôle de zone tampon. De nos jours, les zones anciennement occupées par des stockages d'eau de surface sont remblayées et supportent des grandes infrastructures. Le niveau statique de la nappe phréatique de la plaine alluviale conditionne la stabilité de terrain en amont. L'opération de minage exige des études strictes assurant la stabilité de ce complexe.

D'après les études faites par Noizet, l'extension de ce rocher de Farahantsana atteint jusqu'à une distance de 6 km sur le long de l'Ikopa, à une épaisseur variable, sub-affleurant sur la surface. Le déroctage de Farahantsana ne peut résoudre en totalité le problème d'inondation de la plaine d'Antananarivo si les autres extensions ne sont pas considérées. Il se peut que le résultat ne soit qu'une diminution de quelques centimètres de la hauteur d'eaux.

Dans la réalisation de ce projet des études géophysiques ayant le but de déterminer l'extension et l'épaisseur des rochers sur le lit en aval sont strictement nécessaires.

3.4.3. Déviation de l'Ikopa sur un nouveau lit

Elle consiste à dévier une partie de l'Ikopa avant d'entrer sur le lit ondulé de Bevomanga. Elle rejoint l'Ikopa après le passage de Farahantsana.

Le lit emprunté doit être justifié à ce que le phénomène d'érosion est faible. Le lit doit traverser le plus possible des dépressions, vallée ou bas fond, et avoir la minimale possible de longueur.

Les lits naturels des rivières sont généralement formés par des fractures. La conséquence est l'équilibre entre l'eau de la rivière et l'eau de la nappe aquifère sous jacent. L'étude structurale s'avère nécessaire pour déterminer le trajet du nouveau lit.

a. Paramétrage de l'écoulement

Les caractéristiques de l'écoulement dépendent de la géométrie du lit qui est définie par trois éléments : la pente I du fond ; la surface mouillée et le rayon hydraulique. A part ces trois caractéristiques, il y a aussi le type du substratum ou la perméabilité qui conditionne l'infiltration. Ces caractéristiques sont déterminées selon l'objectif du montage de la déviation.

La pente du fond est justifiée selon le type de substratum. Plus le substratum est perméable, plus la pente du fond doit être importante pour assurer l'écoulement sur le lit.

Lors de la déviation le problème qui se pose c'est la quantité d'eaux à dévier. Cette quantité est déterminée à partir de la courbe de fréquence des débits puis qu'il y a une valeur minimale qu'on ne doit pas dépasser pour maintenir l'équilibre hydrogéologique en amont. Pour ne pas perturber la réserve dynamique en amont qui assure le tarissement pendant les saisons sèches, le plus souvent le débit à considérer est le débit caractéristique maximum dépassé 10 fois par an qui est égale à $245,399 \text{ m}^3$. La prise d'eau vers le nouveau lit sert à dévier le surplus de ce DCM.

b. Le trajet du nouveau lit

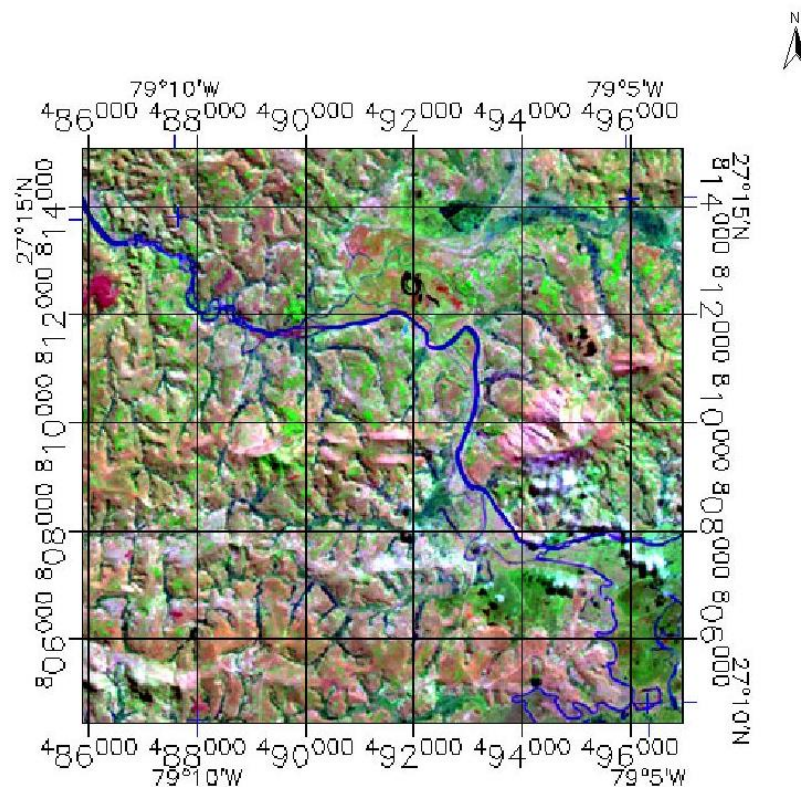
Quel que soit le type de canalisation, le trajet du nouveau lit doit suivre des dépressions ou fractures, le plus possible suivant des linéaments.

Les linéaments englobent toutes structures en forme de ligne ou courbure observées sur les images satellitaires ou sur les photos aériennes, ayant des interprétations géologiques. Elles représentent des fractures, des réseaux hydrographiques, des affleurements géologiques. Pour le cas de ce chapitre on ne tient compte que les fractures ou bas fond.

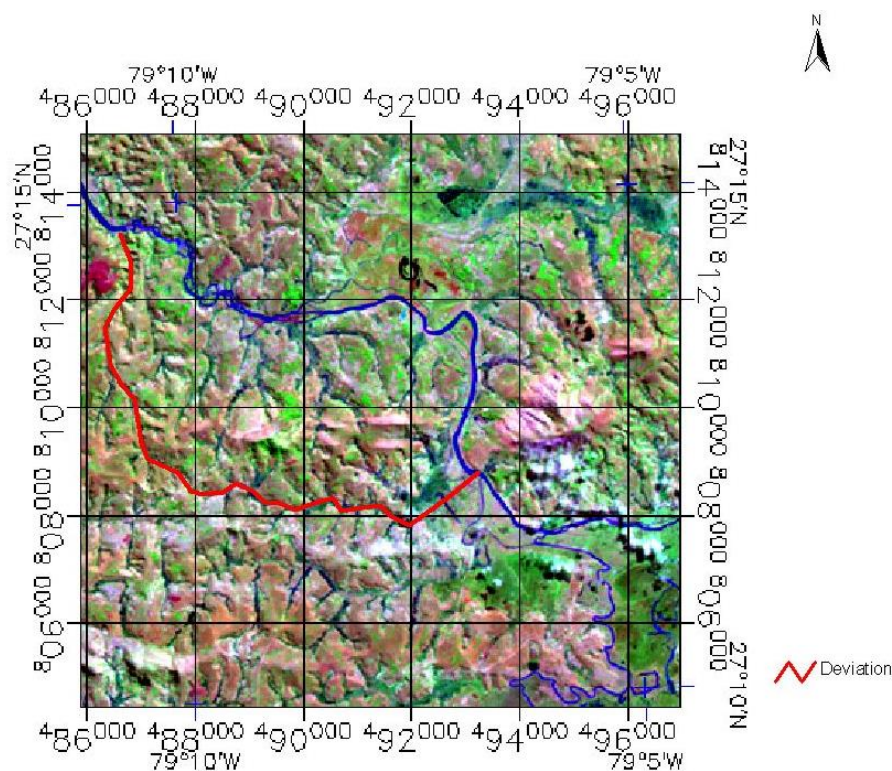
Les matériels de base utilisés pour l'extraction de ces linéaments sont les imageries satellitaires fournies par Landsat TM 7 couvrant la partie aval du bassin versant. On choisi cette imagerie par le fait qu'elle ne représente que les grandes structures.

Les coordonnées sont projetées dans le système de référence Hotine oblique Mercator, équivalent de Laborde Madagascar.

La composition colorée 742 est utilisée. Elle permet de rehausser ou mettre en évidence les structures ou le relief. L'identification de la déviation se fait manuellement.



Composition colorée 742 du Landsat TM 7



Exemple de déviation empruntée

3.4.4. Recommandation

Le choix du lit de déviation exige des études géophysiques pour savoir le type de substratum et la présence ou non de la même formation rencontrée à Farahantsana. Si ce dernier se produit le problème n'est pas résolu.

Au niveau de la plaine alluviale, la délivrance des permis de remblayage et des permis de construction doivent être étudiée en se référant sur l'impacte pouvant se poser sur l'hydrologie. Les habitations perturbent l'écoulement hypodermique, diminuent les infiltrations vers les nappes et augmentent les ruissèlements de surface. Par conséquent, les réserves dynamiques diminuent, elles ne peuvent plus assurer l'alimentation des cours d'eau pendant les saisons sèches alors que l'écoulement devient très important lors des saisons de pluies.

Pour résoudre en totalité le problème de drainage dans la capitale, il fallait réétudier les différents canaux de drainages artificiels qui la desservent. Dater de 1960, il ne répond plus aux besoins actuels. Même persistance d'une pluie pendant quelques heures entraîne une crue sur la capitale.

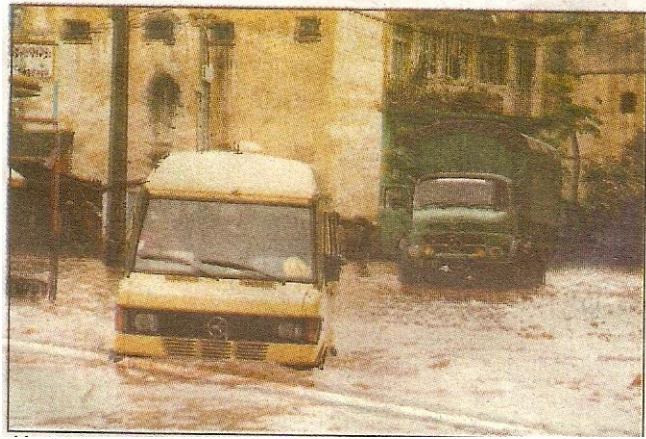


Photo 4 : Crue dans la ville d'Antananarivo, MIDI Madagascar 26 février 2011

Pour entretenir les lits des rivières contre les phénomènes d'alluvionnement, le recalibrage des lits des rivières et des canaux de drainages artificiels est recommandé. Les prises de sable y sont encouragées si elles n'affectent pas les berges

4. Autres problèmes relatifs aux ressources en eau

4.1. La tendance à la pénurie d'eaux

La succession d'années pluviométriques déficitaires, dues au changement climatique, compromet l'alimentation en eau de la ville et de ses environs. La tendance à la pénurie d'eaux résulte du manque ou mauvaise distribution temporelle de précipitation sur le bassin versant. La moyenne de la précipitation annuelle reste constante mais elle se concentre sur une courte période. La période de tarissement des nappes aquifères s'allonge tandis que la période d'infiltration se raccourcit, la réserve d'eau souterraine diminue par conséquent. La plaine d'Antananarivo est très vulnérable à ce problème. Le risque se réfère aux populations qui en majorité utilisent la nappe aquifère pour leurs besoins quotidiens en eau. Ce problème engendre des bouleversements sur les calendriers de culture d'où diminution des produits agricoles. Il influe sur la vie socio-économique de la population.

Le changement climatique règne dans le monde entier. Il est dû à la dégradation de l'environnement et l'effet de serre. Plusieurs auteurs ont dit que la capitale de Madagascar ou Antananarivo est parmi les villes polluées du monde. L'atmosphère est chargée en CO₂ qui dégrade la couche d'ozone et favorise à son tour l'effet de serre et l'élévation de la température sur la

surface de la terre. Le type de la couverture végétale, généralement dénudé, perturbe le cycle hydrologique et résulte le manque de précipitation.

En général, le problème de pénurie d'eau peut être géré si elle est à petite échelle. Puisqu'elle est due au manque de précipitation, la première solution vise à provoquer artificiellement des pluies. Le coût et les effets secondaires restent à savoir. L'amélioration de l'environnement par application des différentes lois sur toutes exploitations des richesses naturelles quel que soit la nature et par renforcement des travaux de reboisement assure la protection durable de l'eau et le bon fonctionnement du cycle hydrologique.

Pour la plaine d'Antananarivo, l'aménagement des vannes sur l'Ikopa à l'exutoire peut résoudre la pénurie en réserve d'eaux souterraines. Il permet de stopper le tarissement ou vidange de la nappe pendant les saisons sèches et par conséquent d'augmenter la réserve exploitable sur la plaine.

4.2. La contamination des réserves d'eau

La contamination des ressources en eau souterraine ou de surface est un problème en liaison avec l'hydrologie. Ces ressources présentent une part considérable dans l'approvisionnement en eau de la capitale et de ses environs. Les principales causes de la contamination sont les ordures ménagères et les rejets industriels versés dans les cours d'eau et vitesse d'écoulement presque nulle favorisant l'infiltration vers les nappes alluvionnaires. Presque tous les écoulements de surface passant par Antananarivo ville et nappes phréatiques sur les bas quartiers peuplés sont atteints.

Sur les bas quartiers de la capitale, zones remblayées, la nappe est très proche de la surface. La pente des canaux de drainage qui y passent est presque nulle. Ils sont vétustes et ne répondent plus aux besoins. Lors des saisons de pluies ils ne peuvent pas évacuer une importante quantité d'eau sur un laps de temps. Lors des saisons sèches l'écoulement y est très faible, presque nul. Les canaux deviennent des égouts, stockages d'eaux usées et ordures qui est un milieu favorable au développement des microbes.

Une étude antérieure a montré que ces ressources en eau souterraine sont menacées d'être contaminées. L'impact de la pollution commence à se faire sentir dans les quotidiens des habitants concernés par :

- des maladies hydriques liées à la qualité de l'eau : la dysenterie, la diarrhée et l'écoulement génital.
- la baisse du rendement des produits agricoles, constatée dans les zones environnantes des rejets d'usines textiles.

L'impact peut se propager vers l'aval et sur les zones irriguées en rizicultures. La solution hydrologique proposée consiste à réétudier les canaux de drainage drainant la capitale pour permettre le bon écoulement pendant les saisons sèches et éviter l'inondation de la ville pendant les périodes de pluies. Pour une solution pérenne, les autorités doivent s'orienter sur la protection de l'environnement par application des différentes lois qui régissent les investissements (MECIE) et par le renforcement de la gestion des ordures au niveau des Fokontany. Le ramassage des ordures et l'entretien des canaux de drainage, sous la responsabilité respective de la commune urbaine et de l'APIPA, doivent être financés continuellement pour satisfaire les besoins en infrastructure.

CONCLUSION

Le bassin versant supérieur de l'Ikopa contrôlé à Bevomanga est caractérisé par une morphologie typique d'origine tectonique formé par des résidus de collines, une vaste plaine, et des réseaux hydrographiques en forme de chevelure. Ces trois éléments conditionnent le comportement hydrologique de ce bassin versant.

Le traitement des données de jaugeages existantes a permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrologiques de ce bassin. La comparaison des trois courbes de jaugeage disponibles, sur la station limnimétriques de Bevomanga et sur des dates bien réparties, montre l'évolution de l'alluvionnement du lit de l'Ikopa sur la section de mesure. Sur les quarante dernières années le décalage d'échelle est environ 1m.

L'étude hydrométrique basée sur des jaugeages a permis de caractériser l'écoulement pendant une année hydrologique : connaissance des divers débits caractéristiques de l'Ikopa à Bevomanga. L'étude du tarissement sur le bassin à partir de la courbe d'étiage permet de déduire la grande capacité de stockage des nappes phréatiques. Ces réserves assurent l'alimentation des cours d'eau pendant la période sèche de l'année hydrologique. L'existence de ce réservoir est conditionnée par le barrage rocheux à l'exutoire du bassin en question se trouvant à Farahantsana.

La plaine alluviale d'Antananarivo est une des unités morphologiques très importantes pour le bassin versant supérieur de l'Ikopa. La capitale de la grande île y est bâtie. Le risque d'inondation de cette plaine est causé par la morphologie, l'hydrologie du bassin versant mais aussi par la présence de la capitale sur la plaine. Plusieurs sont les solutions déjà avancées. Chacune présente des avantages et des inconvénients. Deux solutions sont étudiées dans ce travail : déroctage de Farahantsana et canal de dérivation en amont de Farahantsana. D'après les résultats de l'étude des basses eaux, la meilleure solution proposée dans ce travail vise à dévier une partie de l'Ikopa pendant les périodes de crues. Elle consiste à aider l'exutoire à l'évacuation des apports en amonts en gardant de débit caractéristique DCM sur l'exutoire de Farahantsana. Elle permet de réduire le risque en amont, sur les zones de rizicultures, en notant que le risque d'inondation de la capitale exige des réhabilitations et l'addition des canaux de drainage artificiels.

La déviation choisie n'est qu'une hypothèse basée seulement sur des données thématiques. La justification du choix du trajet du nouveau lit et la réalisation des travaux exigent des études structurales, géotechnique et géophysique.

A part l'inondation, La plaine d'Antananarivo est exposée à d'autres risques : le risque de pénurie en eaux souterraines et le risque de contamination des ressources en eaux de surface ou souterraine. Elles sont toutes les deux en relation avec le comportement hydrologique du haut bassin versant de l'Ikopa. Quand au problème de la pénurie, la solution dépend du temps de tarissement de la nappe qui est maintenu par le débit à l'exutoire. Pour le problème de contamination des ressources en eaux la résolution repose sur l'application des différentes lois régissant l'environnement, la sensibilisation de la population sur la gestion des ordures et la réhabilitation et adduction des canaux de drainage de la capitale.

BIBLIOGRAPHIE

- Anonyme 1965** : Notes hydrologiques sur les rivières des Hauts-Plateaux de Madagascar, *Extrait rapport de prospection hydro-électrique EDF*, 20p
- ALDGHERI M., 1963** : Monographie hydrologique de l'Ikopa et de la Betsiboka/ B-Données hydrologiques, *Office de la recherche scientifique et technique outre-mer avec la société d'énergie de Madagascar*, p3à p38
- ALDGHERI M., 1979** : Manuel d'hydrométrie- tome IV, mesure des débits à partir des vitesses, *Ed. ORSTOM Paris*, 273p
- ALDGHERI M., ROCHE M., 1984** : Monographie hydrologique de l'Ikopa et de la Betsiboka/ C-Interprétation des résultats et caractéristique de régime, *Office de la recherche scientifique et technique outre-mer avec la société d'énergie de Madagascar*, p1à p64
- ANDRIANASOLO L.P., 2000** : La plaine d'Antananarivo et ses environs : cadre géologique et géotechnique. *Mémoire d'ingéniorat en géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo*, 133 p.
- BANDAR D. A., 2006** : Evaluation des ressources en eaux souterraines dans la plaine de Betsimitatatra et en eaux de surface dans la région Analamanga en vue d'une gestion intégrée des ressources en eau, *Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée*, 44p
- CHAPERON P., DANLOUX L., FERRY L., 1993**: Fleuves et rivières de Madagascar. *Edit. ORSTOM. Monographie hydrologique n°10*, 855p
- LAPLAINE, 1952** : Etude géologique des feuilles Miarnarivo et Tananarive, *Carte géologique hors texte en deux couleurs*
- NAJIB Hamid R., 2000** : Etude de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique de la Doria (Massif des Bauges-Savoie), *thèse de Doctorat mention Géographie-hydrologie, Université de Louis Pasteur Strasbourg I*, 211p
- NOIZET G., 1967** : Étude pour l'aménagement de la plaine de Tananarive. *Rapport Annuel du Service Géologique de Madagascar, Antananarivo*, 6 p.
- NOIZET G., 1967** : La plaine de Tananarive : site Géologique et problème d'assainissement. *Rapport Annuel du Service Géologique de Madagascar, Antananarivo*, 3p.
- PY B., 1996** : Statistique descriptive, 4è édition, *Fascicule scientifique*
- RAKOTOSOA A. H., 2007** : Etude hydrogéotechniques de la plaine d'Antananarivo, *mémoire ingéniorat mines, Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo*, 60p
- RANDREMANANA RV., MIGLIANI R., RAKOTOMANGA S., 2001** : Système d'Information Géographique et Santé : application à la ville d'Antananarivo, *Article, Institut Pasteur de Madagascar*; 5p

RAZAFIMANJATO L. L., 1992 : Modélisation hydrologique du bassin versant de l'Ikopa a Antananarivo, *mémoire DEA national d'hydrologie, université des sciences de Montpellier*, 151p

RASOAMIADANA R., 2004 : Caractérisation de la qualité des eaux souterraines face à la pollution : cas de la ville d'Antananarivo et ses environs, *Mémoire DEA Génie minéral, ESPA*, 45p

ROBISON L. R. : hydrologie, *Formation doctorale Génie minéral, Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo*.

RODIER J., 1964 : Principe généraux de l'étude des crues, *ORSTOM fond documentaire*, 28p

VARLET H., 1966 : Barrage réservoir, tome I, *éd Eyrolles-Paris p. 79 à p147*.

ANNEXE

Novembre_2004		
Date	Hauteur	Débit
1-nov.	1,35	22,32
2-nov.	1,38	24,37
3-nov.	1,41	27,00
4-nov.	1,34	21,64
5-nov.	1,39	25,06
6-nov.	1,38	24,37
7-nov.	1,34	21,64
8-nov.	1,37	23,69
9-nov.	1,33	20,97
10-nov.	1,33	20,97
11-nov.	1,34	21,64
12-nov.	1,34	21,64
13-nov.	1,34	21,64
14-nov.	1,34	21,64
15-nov.	1,34	21,64
16-nov.	1,34	21,64
17-nov.	1,36	23,00
18-nov.	1,35	22,32
19-nov.	1,36	23,00
20-nov.	1,38	24,37
21-nov.	1,36	23,00
22-nov.	1,38	24,37
23-nov.	1,38	24,37
24-nov.	1,34	21,64
25-nov.	1,37	23,69
26-nov.	1,34	21,64
27-nov.	1,34	21,64
28-nov.	1,39	25,06
29-nov.	1,34	21,64
30-nov.	1,36	23,00

Décembre_2004		
Date	Hauteur	Débit
1-déc.	1,35	22,32
2-déc.	1,28	17,63
3-déc.	1,24	15,01
4-déc.	1,22	13,71
5-déc.	1,21	13,07
6-déc.	1,22	13,71
7-déc.	1,19	11,79
8-déc.	1,2	12,43
9-déc.	1,2	12,43
10-déc.	1,19	11,79
11-déc.	1,17	10,52
12-déc.	1,17	10,52
13-déc.	1,17	10,52
14-déc.	1,19	11,79
15-déc.	1,25	15,66
16-déc.	1,3	18,95
17-déc.	1,65	43,93
18-déc.	2,31	100,01
19-déc.	2,54	122,32
20-déc.	2,98	168,97
21-déc.	3,27	202,57
22-déc.	3,27	202,57
23-déc.	3,2	194,25
24-déc.	3,07	179,15
25-déc.	3,14	187,22
26-déc.	3,29	204,97
27-déc.	3,3	206,17
28-déc.	3,21	195,43
29-déc.	3,04	175,73
30-déc.	2,84	153,56
31-déc.	2,81	150,32

Janvier_2005		
Date	Hauteur	Débit
1-janv.	2,93	163,40
2-janv.	3,24	198,99
3-janv.	3,31	207,38
4-janv.	3,3	206,17
5-janv.	3,19	193,07
6-janv.	3,05	176,87
7-janv.	2,81	150,32
8-janv.	2,74	142,87
9-janv.	3,08	180,30
10-janv.	3,31	207,38
11-janv.	3,61	244,85
12-janv.	3,79	268,50
13-janv.	3,7	256,56
14-janv.	3,44	223,32
15-janv.	3,12	184,90
16-janv.	2,79	148,18
17-janv.	2,54	122,32
18-janv.	2,27	96,28
19-janv.	2,07	78,26
20-janv.	1,92	65,45
21-janv.	1,87	61,32
22-janv.	1,88	62,14
23-janv.	1,86	60,50
24-janv.	1,85	59,68
25-janv.	1,74	50,88
26-janv.	2,24	93,51
27-janv.	2,35	103,79
28-janv.	2,52	120,32
29-janv.	3,02	173,47
30-janv.	3,3	206,17
31-janv.	3,32	208,59

Février_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-févr	3,11	183,75
02-févr	2,74	142,87
03-févr	2,58	126,34
04-févr	2,69	137,63
05-févr	2,77	146,05
06-févr	2,91	161,20
07-févr	3,07	179,15
08-févr	3,04	175,73
09-févr	2,9	160,10
10-févr	2,97	167,85
11-févr	3,01	172,34
12-févr	3,01	172,34
13-févr	2,93	163,40
14-févr	2,76	144,99
15-févr	2,6	128,37
16-févr	2,49	117,35
17-févr	2,33	101,90
18-févr	2,27	96,28
19-févr	2,38	106,65
20-févr	2,28	97,21
21-févr	2,65	133,49
22-févr	2,79	148,18
23-févr	2,85	154,64
24-févr	2,75	143,93
25-févr	2,6	128,37
26-févr	2,51	119,33
27-févr	2,53	121,32
28-févr	2,75	143,93

Mars_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-mars	2,88	157,91
02-mars	3,18	191,90
03-mars	3,58	240,99
04-mars	3,73	260,52
05-mars	3,8	269,84
06-mars	4	297,19
07-mars	3,89	282,01
08-mars	3,76	264,50
09-mars	3,52	233,35
10-mars	3,45	224,56
11-mars	3,45	224,56
12-mars	3,51	232,09
13-mars	3,43	222,08
14-mars	3,53	234,62
15-mars	3,5	230,83
16-mars	3,3	206,17
17-mars	3,05	176,87
18-mars	2,84	153,56
19-mars	2,69	137,63
20-mars	2,52	120,32
21-mars	2,39	107,61
22-mars	2,41	109,54
23-mars	2,35	103,79
24-mars	2,27	96,28
25-mars	2,14	84,44
26-mars	2,06	77,39
27-mars	2,03	74,78
28-mars	1,97	69,65
29-mars	1,89	62,96
30-mars	1,91	64,62
31-mars	2,03	74,78

Avril_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-avr	2,32	100,95
02-avr	2,39	107,61
03-avr	2,24	93,51
04-avr	2,12	82,66
05-avr	1,96	68,81
06-avr	1,9	63,79
07-avr	1,84	58,87
08-avr	1,82	57,25
09-avr	1,95	67,96
10-avr	2,06	77,39
11-avr	2,07	78,26
12-avr	2,05	76,52
13-avr	2,09	80,01
14-avr	2,11	81,78
15-avr	2,01	73,06
16-avr	1,94	67,12
17-avr	2,01	73,06
18-avr	1,97	69,65
19-avr	1,8	55,64
20-avr	1,82	57,25
21-avr	1,82	57,25
22-avr	1,91	64,62
23-avr	2,1	80,89
24-avr	2,29	98,14
25-avr	2,22	91,67
26-avr	2,1	80,89
27-avr	1,95	67,96
28-avr	1,95	67,96
29-avr	2,04	75,65
30-avr	2,04	75,65

Mai_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-mai	1,95	67,96
02-mai	1,9	63,79
03-mai	1,84	58,87
04-mai	1,8	55,64
05-mai	1,77	53,25
06-mai	1,71	48,54
07-mai	1,74	50,88
08-mai	1,75	51,67
09-mai	1,73	50,10
10-mai	1,69	46,99
11-mai	1,68	46,22
12-mai	1,71	48,54
13-mai	1,74	50,88
14-mai	1,74	50,88
15-mai	1,72	49,32
16-mai	1,71	48,54
17-mai	1,72	49,32
18-mai	1,73	50,10
19-mai	1,74	50,88
20-mai	1,73	50,10
21-mai	1,73	50,10
22-mai	1,72	49,32
23-mai	1,68	46,22
24-mai	1,72	49,32
25-mai	1,7	47,77
26-mai	1,77	53,25
27-mai	1,98	70,50
28-mai	1,95	67,96
29-mai	1,83	58,06
30-mai	1,79	54,84
31-mai	1,75	51,67

Juin_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-juin	1,71	48,54
02-juin	1,7	47,77
03-juin	1,68	46,22
04-juin	1,67	45,46
05-juin	1,64	43,17
06-juin	1,64	43,17
07-juin	1,67	45,46
08-juin	1,65	43,93
09-juin	1,64	43,17
10-juin	1,61	40,91
11-juin	1,6	40,16
12-juin	1,58	38,67
13-juin	1,58	38,67
14-juin	1,62	41,66
15-juin	1,62	41,66
16-juin	1,6	40,16
17-juin	1,59	39,41
18-juin	1,65	43,93
19-juin	1,63	42,41
20-juin	1,66	44,69
21-juin	1,64	43,17
22-juin	1,65	43,93
23-juin	1,63	42,41
24-juin	1,61	40,91
25-juin	1,59	39,41
26-juin	1,6	40,16
27-juin	1,61	40,91
28-juin	1,6	40,16
29-juin	1,58	38,67
30-juin	1,56	37,19

Juillet_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-juil	1,55	36,46
02-juil	1,55	36,46
03-juil	1,56	37,19
04-juil	1,49	32,10
05-juil	1,46	29,96
06-juil	1,45	29,25
07-juil	1,42	27,15
08-juil	1,47	30,67
09-juil	1,44	28,55
10-juil	1,46	29,96
11-juil	1,43	27,85
12-juil	1,46	29,96
13-juil	1,49	32,10
14-juil	1,52	34,27
15-juil	1,53	34,99
16-juil	1,5	32,82
17-juil	1,48	31,39
18-juil	1,51	33,54
19-juil	1,48	31,39
20-juil	1,53	34,99
21-juil	1,72	49,32
22-juil	1,68	46,22
23-juil	1,61	40,91
24-juil	1,57	37,93
25-juil	1,52	34,27
26-juil	1,57	37,93
27-juil	1,57	37,93
28-juil	1,55	36,46
29-juil	1,51	33,54
30-juil	1,51	33,54
31-juil	1,46	29,96

Août_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-août	1,51	33,54
02-août	1,51	33,54
03-août	1,49	32,10
04-août	1,52	34,27
05-août	1,51	33,54
06-août	1,49	32,10
07-août	1,49	32,10
08-août	1,45	29,25
09-août	1,45	29,25
10-août	1,46	29,96
11-août	1,46	29,96
12-août	1,46	29,96
13-août	1,46	29,96
14-août	1,48	31,39
15-août	1,45	29,25
16-août	1,47	30,67
17-août	1,49	32,10
18-août	1,46	29,96
19-août	1,45	29,25
20-août	1,45	29,25
21-août	1,43	27,85
22-août	1,41	26,45
23-août	1,39	25,06
24-août	1,43	27,85
25-août	1,43	27,85
26-août	1,43	27,85
27-août	1,38	24,37
28-août	1,39	25,06
29-août	1,39	25,06
30-août	1,43	27,85
31-août	1,45	29,25

Septembre_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-sept	1,45	29,25
02-sept	1,46	29,96
03-sept	1,55	36,46
04-sept	1,46	29,96
05-sept	1,46	29,96
06-sept	1,41	26,45
07-sept	1,42	27,15
08-sept	1,39	25,06
09-sept	1,37	23,69
10-sept	1,36	23,00
11-sept	1,35	22,32
12-sept	1,39	25,06
13-sept	1,34	21,64
14-sept	1,36	23,00
15-sept	1,36	23,00
16-sept	1,36	23,00
17-sept	1,36	23,00
18-sept	1,36	23,00
19-sept	1,36	23,00
20-sept	1,38	24,37
21-sept	1,38	24,37
22-sept	1,38	24,37
23-sept	1,36	23,00
24-sept	1,33	20,97
25-sept	1,3	18,95
26-sept	1,37	23,69
27-sept	1,37	23,69
28-sept	1,37	23,69
29-sept	1,36	23,00
30-sept	1,35	22,32

Octobre_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-oct	1,36	23,00
02-oct	1,39	25,06
03-oct	1,35	22,32
04-oct	1,39	25,06
05-oct	1,4	25,75
06-oct	1,35	22,32
07-oct	1,31	19,62
08-oct	1,29	18,29
09-oct	1,34	21,64
10-oct	1,39	25,06
11-oct	1,37	23,69
12-oct	1,36	23,00
13-oct	1,29	18,29
14-oct	1,25	15,66
15-oct	1,22	13,71
16-oct	1,25	15,66
17-oct	1,28	17,63
18-oct	1,28	17,63
19-oct	1,28	17,63
20-oct	1,31	19,62
21-oct	1,29	18,29
22-oct	1,27	16,97
23-oct	1,27	16,97
24-oct	1,26	16,31
25-oct	1,27	16,97
26-oct	1,25	15,66
27-oct	1,25	15,66
28-oct	1,24	15,01
29-oct	1,24	15,01
30-oct	1,25	15,66
31-oct	1,26	16,31

Novembre_2005		
Date	Hauteur	Débit
1-nov.	1,25	15,66
2-nov.	1,27	16,97
3-nov.	1,27	16,97
4-nov.	1,26	16,31
5-nov.	1,25	15,66
6-nov.	1,24	15,01
7-nov.	1,27	16,97
8-nov.	1,25	15,66
9-nov.	1,25	15,66
10-nov.	1,23	14,36
11-nov.	1,23	14,36
12-nov.	1,23	14,36
13-nov.	1,23	14,36
14-nov.	1,22	13,71
15-nov.	1,24	15,01
16-nov.	1,26	16,31
17-nov.	1,23	14,36
18-nov.	1,24	15,01
19-nov.	1,30	18,95
20-nov.	1,31	19,62
21-nov.	1,40	25,75
22-nov.	1,51	33,54
23-nov.	1,59	39,41
24-nov.	1,69	46,99
25-nov.	1,71	48,54
26-nov.	1,75	51,67
27-nov.	2,09	80,01
28-nov.	2,21	90,76
29-nov.	2,16	86,23
30-nov.	2,11	81,78

Décembre_2005		
Date	Hauteur	Débit
01-déc	1,94	67,12
02-déc	1,90	63,79
03-déc	2,15	85,34
04-déc	2,30	99,08
05-déc	2,07	78,26
06-déc	1,87	61,32
07-déc	1,84	58,87
08-déc	2,31	100,01
09-déc	2,54	122,32
10-déc	2,53	121,32
11-déc	2,48	116,36
12-déc	2,47	115,38
13-déc	2,74	142,87
14-déc	2,88	157,91
15-déc	3,04	175,73
16-déc	3,22	196,61
17-déc	3,22	196,61
18-déc	3,04	175,73
19-déc	2,71	139,72
20-déc	2,51	119,33
21-déc	2,53	121,32
22-déc	2,78	147,12
23-déc	3,01	172,34
24-déc	2,96	166,73
25-déc	2,71	139,72
26-déc	2,41	109,54
27-déc	2,63	131,44
28-déc	2,91	161,20
29-déc	2,98	168,97
30-déc	3,32	208,59
31-déc	3,69	255,25

Novembre_2008		
Date	Hauteur	Débit
01-nov	1,67	47,70
02-nov	1,62	43,99
03-nov	1,59	41,21
04-nov	1,59	40,29
05-nov	1,56	38,44
06-nov	1,53	34,76
07-nov	1,54	34,76
08-nov	1,59	39,36
09-nov	1,63	43,06
10-nov	1,68	47,70
11-nov	1,7	49,56
12-nov	1,73	53,29
13-nov	1,78	56,09
14-nov	1,85	62,66
15-nov	1,91	68,32
16-nov	1,88	66,43
17-nov	1,84	65,49
18-nov	1,70	50,49
19-nov	1,66	47,70
20-nov	1,63	43,99
21-nov	1,62	43,06
22-nov	1,64	43,99
23-nov	1,69	47,70
24-nov	1,73	51,42
25-nov	1,81	58,90
26-nov	1,88	65,49
27-nov	1,93	70,21
28-nov	1,96	74,00
29-nov	2,00	77,80
30-nov	2,02	79,71

Décembre_2008		
Date	Hauteur	Débit
01-déc	2,04	82,57
02-déc	1,89	75,90
03-déc	1,87	76,85
04-déc	1,85	66,43
05-déc	1,97	76,85
06-déc	1,79	66,43
07-déc	1,79	60,78
08-déc	1,74	55,16
09-déc	1,72	52,36
10-déc	1,94	64,54
11-déc	1,99	77,80
12-déc	1,82	62,66
13-déc	1,81	59,84
14-déc	1,78	58,90
15-déc	1,74	55,16
16-déc	1,75	56,09
17-déc	1,64	46,77
18-déc	1,54	37,52
19-déc	1,47	31,09
20-déc	1,44	27,43
21-déc	1,41	22,87
22-déc	1,38	21,96
23-déc	1,44	18,32
24-déc	1,50	19,23
25-déc	1,55	22,87
26-déc	1,61	42,14
27-déc	1,64	52,36
28-déc	1,69	43,06
29-déc	1,77	36,60
30-déc	1,71	51,42
31-déc	1,87	66,43

Janvier_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-janv	2,10	88,32
02-janv	2,30	107,17
03-janv	2,38	115,47
04-janv	2,34	139,20
05-janv	2,62	139,20
06-janv	2,69	146,18
07-janv	2,79	155,73
08-janv	2,85	162,31
09-janv	2,92	169,41
10-janv	2,93	169,92
11-janv	2,71	148,19
12-janv	2,45	122,35
13-janv	2,43	120,38
14-janv	2,26	103,28
15-janv	2,36	113,51
16-janv	2,27	104,74
17-janv	2,37	114,00
18-janv	2,45	121,85
19-janv	2,48	125,30
20-janv	2,89	166,42
21-janv	3,15	193,01
22-janv	3,17	194,56
23-janv	2,97	174,52
24-janv	2,92	168,90
25-janv	2,89	166,35
26-janv	2,78	154,73
27-janv	2,66	142,69
28-janv	2,41	117,93
29-janv	2,20	97,47
30-janv	2,04	82,09
31-janv	2,61	108,63

Février_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-févr	2,34	111,56
02-févr	2,42	116,45
03-févr	2,53	126,29
04-févr	2,69	156,23
05-févr	2,82	156,23
06-févr	3,02	173,48
07-févr	3,23	197,15
08-févr	3,41	216,98
09-févr	3,62	237,07
10-févr	3,81	256,34
11-févr	3,92	276,92
12-févr	3,82	266,06
13-févr	3,74	258,49
14-févr	3,63	246,67
15-févr	3,50	230,70
16-févr	3,42	223,30
17-févr	3,29	209,64
18-févr	3,18	199,22
19-févr	2,92	177,57
20-févr	2,88	168,39
21-févr	2,79	158,25
22-févr	2,71	150,19
23-févr	2,61	139,19
24-févr	2,55	134,21
25-févr	2,44	123,33
26-févr	2,36	114,49
27-févr	2,31	109,60
28-févr	2,27	101,82

Mars_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-mars	2,36	113,51
02-mars	2,41	117,43
03-mars	2,35	114,49
04-mars	2,25	97,95
05-mars	2,23	97,95
06-mars	2,19	98,92
07-mars	2,06	90,24
08-mars	1,93	74,00
09-mars	1,84	64,54
10-mars	1,79	60,78
11-mars	1,87	62,66
12-mars	2,03	77,80
13-mars	2,27	101,82
14-mars	2,40	114,49
15-mars	2,48	124,32
16-mars	2,53	128,26
17-mars	2,59	134,21
18-mars	2,69	144,18
19-mars	2,08	138,19
20-mars	2,49	128,26
21-mars	2,41	119,39
22-mars	2,40	117,43
23-mars	1,86	114,49
24-mars	1,85	112,53
25-mars	2,32	111,56
26-mars	2,27	101,82
27-mars	2,43	116,45
28-mars	2,43	116,45
29-mars	2,23	110,58
30-mars	2,01	82,57
31-mars	2,17	71,15

Mai_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-mai	1,60	41,21
02-mai	1,62	43,06
03-mai	1,68	48,17
04-mai	1,74	59,84
05-mai	1,80	59,84
06-mai	1,77	56,56
07-mai	1,75	55,16
08-mai	1,70	50,49
09-mai	1,67	47,24
10-mai	1,64	44,91
11-mai	1,61	42,14
12-mai	1,58	39,36
13-mai	1,57	37,98
14-mai	1,54	35,68
15-mai	1,53	34,30
16-mai	1,50	32,00
17-mai	1,49	30,63
18-mai	1,47	28,80
19-mai	1,45	27,43
20-mai	1,46	27,88
21-mai	1,44	26,06
22-mai	1,43	25,60
23-mai	1,41	23,78
24-mai	1,44	26,51
25-mai	1,47	29,25
26-mai	1,46	28,34
27-mai	1,48	29,71
28-mai	1,47	29,26
29-mai	1,54	35,68
30-mai	1,54	35,68
31-mai	1,53	34,30

Juin_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-juin	1,52	33,84
02-juin	1,54	35,68
03-juin	1,53	34,30
04-juin	1,55	34,30
05-juin	1,53	34,30
06-juin	1,52	33,84
07-juin	1,49	31,09
08-juin	1,48	29,71
09-juin	1,50	31,55
10-juin	1,43	25,15
11-juin	1,48	29,71
12-juin	1,48	29,71
13-juin	1,49	30,63
14-juin	1,46	28,34
15-juin	1,47	28,80
16-juin	1,46	28,34
17-juin	1,47	29,26
18-juin	1,46	28,34
19-juin	1,48	30,17
20-juin	1,47	29,25
21-juin	1,48	29,71
22-juin	1,50	31,55
23-juin	1,49	31,09
24-juin	1,49	31,09
25-juin	1,50	31,55
26-juin	1,50	32,00
27-juin	1,51	32,92
28-juin	1,51	32,92
29-juin	1,52	33,84
30-juin	1,50	31,55

Juillet_2009		
Date	Hauteur	Débit
01-juil	1,52	33,84
02-juil	1,54	35,68
03-juil	1,53	34,30
04-juil	1,55	34,30
05-juil	1,53	34,30
06-juil	1,52	33,84
07-juil	1,49	31,09
08-juil	1,48	29,71
09-juil	1,50	31,55
10-juil	1,43	25,15
11-juil	1,48	29,71
12-juil	1,48	29,71
13-juil	1,49	30,63
14-juil	1,46	28,34
15-juil	1,47	28,80
16-juil	1,47	29,26
17-juil	1,47	29,26
18-juil	1,46	28,34
19-juil	1,53	34,77
20-juil	1,47	29,25
21-juil	1,48	29,71
22-juil	1,50	31,55
23-juil	1,50	31,55
24-juil	1,49	30,63
25-juil	1,50	31,55
26-juil	1,49	30,63
27-juil	1,50	31,55
28-juil	1,51	32,46
29-juil	1,52	33,38
30-juil	1,49	30,63
31-juil	1,50	31,55

Août_2009		
Date	Hauteur	Débit
1-août	1,42	24,69
2-août	1,42	24,69
3-août	1,45	27,43
4-août	1,44	26,97
5-août	1,45	26,97
6-août	1,44	26,06
7-août	1,45	26,97
8-août	1,44	26,06
9-août	1,44	26,51
10-août	1,34	17,42
11-août	1,35	18,32
12-août	1,36	18,78
13-août	1,35	17,87
14-août	1,34	16,97
15-août	1,36	18,78
16-août	1,33	16,06
17-août	1,36	19,23
18-août	1,36	19,23
19-août	1,37	19,69
20-août	1,38	20,60
21-août	1,40	22,41
22-août	1,41	23,32
23-août	1,43	25,14
24-août	1,40	22,41
25-août	1,48	29,71
26-août	1,52	33,38
27-août	1,49	31,09
28-août	1,51	32,92
29-août	1,45	26,97
30-août	1,42	24,69
31-août	1,43	25,14

Octobre_2009		
Date	Hauteur	Débit
1-oct.	1,40	22,87
2-oct.	1,40	22,41
3-oct.	1,42	24,23
4-oct.	1,40	26,51
5-oct.	1,44	26,51
6-oct.	1,42	24,23
7-oct.	1,58	38,91
8-oct.	1,69	49,57
9-oct.	1,70	50,03
10-oct.	1,62	43,06
11-oct.	1,62	43,06
12-oct.	1,61	42,14
13-oct.	1,60	41,24
14-oct.	1,46	28,34
15-oct.	1,36	19,23
16-oct.	1,37	19,69
17-oct.	1,38	21,05
18-oct.	1,40	22,87
19-oct.	1,36	18,78
20-oct.	1,37	19,69
21-oct.	1,35	18,33
22-oct.	1,34	17,42
23-oct.	1,38	21,05
24-oct.	1,35	17,87
25-oct.	1,36	19,23
26-oct.	1,33	16,51
27-oct.	1,33	16,06
28-oct.	1,37	19,69
29-oct.	1,35	18,33
30-oct.	1,36	18,78
31-oct.	1,35	17,87

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES.....	i
LISTE DES FIGURES.....	ii
LISTE DES PHOTOS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	iv
 INTRODUCTION.....	 1
 1.PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	 3
1.1. Delimitation et description.....	3
1.2. Contexte climatique.....	5
1.3. Deficit d'écoulement :.....	8
1.4. Contexte hydrologique.....	8
1.5. Contexte hydrogeologique.....	10
1.6. Géologie régionale.....	11
1.7. Structures et tectonique.....	14
1.8. Unité morphologique.....	15
1.9. Occupation du sol.....	18
 2.ANALYSE HYDROLOGIQUE.....	 18
2.1. Les stations hydrométriques.....	18
2.2. Jaugeages.....	20
2.2.1. Données existantes.....	20
2.2.2. Les courbes de tarage.....	22
2.2.3. Le barème de jaugeage.....	26
2.3. Traitement des données.....	27
2.3.1. Les débits instantanés.....	28
2.3.2. Les débits moyens journaliers et débits caractéristiques.....	29
2.3.3. Apport annuel et lame d'eau.....	33
2.3.4. Coefficient d'écoulement.....	33
2.3.5. Débits moyens mensuels et annuels.....	34
2.4. Etude de crue.....	35
2.5. Fonctionnement hydrodynamique et étude de basse eaux.....	36
2.5.1. Structure hydrodynamique de la plaine alluviale.....	36
2.5.2. Courbe de tarissement.....	37
2.5.3. Courbe de décrue ou infiltration.....	38
2.5.4. Volume dynamique et volume d'infiltration.....	39
2.5.5. Paramètres de recSSION.....	39
 3.LE RISQUE D'INONDATION DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO.....	 41
3.1. Inondation de la plaine d'Antananarivo.....	41
3.2. Zone vulnérable à l'inondation.....	42
3.3. Solutions et travaux d'aménagements antérieurs.....	43
3.3.1. Travaux en amont.....	43
3.3.2. Travaux en aval.....	44
3.4. . Propositions.....	46
3.4.1. L'équilibre hydrologique en amont :.....	46

3.4.2.	Aménagement d'un barrage à Farahantsana	47
3.4.3.	Déviation d'une partie de l'Ikopa sur un nouveau lit.....	48
a.	Paramétrage de l'écoulement	48
b.	Le trajet du nouveau lit	48
3.4.4.	Recommandations	50
4.	AUTRES PROBLEMES RELATIFS AUX RESSOURCES EN EAU	51
4.1	La tendance à la pénurie d'eaux.....	51
4.2.	La pollution urbaine.	52
CONCLUSION.....		
BIBLIOGRAPHIE		
ANNEXES		

Titre de l'ouvrage :	CONTRIBUTION DE L'HYDROLOGIE ET DE LA GEOMORPHOLOGIE A L'ETUDE DU SEUIL DE BEVOMANGA
Auteurs :	RAKOTOSOA Harimalala Antenaina Herivola
Rapporteur	Dr. ROBISON Laurent Roger
Nombre de pages :	69
Nombre de tableaux :	05
Nombre de figures :	28
Nombre de photos :	06

RESUME

Ikopa, affluent de la Betsiboka, est une des rivières de Madagascar. Son bassin supérieur, appartenant aux Hautes Terres de Madagascar et contrôlé à Bevomanga, est caractérisé par la présence d'une vaste plaine alluvionnaire d'Antananarivo. Le seuil exutoire de ce bassin est formé par un lit généralement ondulé, et est caractérisé par des affleurements de granite sur le lit. L'ensemble des caractères physiques de la plaine et de ce seuil forment les principales causes de l'inondation de la plaine d'Antananarivo. L'étude statistique des données hauteurs d'eaux/débits et le dépouillement des jaugeages sur la station de Bevomanga, menés sur cette étude, permettent de caractériser le comportement hydrologique, les débits caractéristiques et le comportement hydrodynamique de ce bassin. Ainsi ce bassin a un temps de tarissement très important, presque la moitié du temps de base de l'hydrogramme de débit. Ce tarissement est traduit par un énorme volume de réserve dynamique. Ces études mènent à une conclusion : importance de la présence de Farahantsana sur la sécurité urbaine de la capitale. Ce condition conduit à une proposition pour résoudre le problème d'inondation sur la plaine : déviation d'une part des apports de l'Ikopa pendant la période de crue sur un lit suivant les dépressions, proposition dont la faisabilité exige des études géophysique, géotechnique, hydrogéologique qui est un bon thème de recherche pour un

Mots clés : Ikopa, hydrologie, Plaine d'Antananarivo, Bevomanga, Farahantsana, Inondation.

Ikopa is on of the West Rivers of Madagascar, she is Betsiboka tributary. Her superior versant basin is in the Analamanga region, and controlled by the Bevomanga point where are dam of granite formation. This basin includes the plain of Antananarivo, characterized by the urbanism development. The physical characteristic of this plain and morphology of Bevomanga-Farahantsana are the principal cause of the flood in this region. The statistical analysis of the rivers elevation-flow data and gauging analysis give information of hydrology functioning, flow characteristics and hydrodynamic functioning of this basin and plain. Therefore, we can say that Farahantsana dam assure hydrogéoloqic and urban géotechnics balance in the plain. They result allow one proposition to resolve the flood problem: by-bass linking two point of Ikopa: just after confluence with right ant left bank and just after Farahantsana. This proposition requires geophysics and géotechnics consideration whitch are new rechearch theme.

Keys words : Ikopa, hydrology, Plain of Antananarivo, Bevomanga, Farahantsana, flood.