

SOMMMAIRE

- REMERCIEMENTS
- SOMMAIRE
- LISTE DES ABBREVIATIONS
- LISTE DES TABLEAUX
- LISTE DES FIGURES
- LISTE DES ANNEXES
- INTRODUCTION
- PLAN DE SITUATION

Première partie: **FACTEURS CONDITIONNELS DES REGIMES HYDROLOGIQUES**

Chapitre 1 : **Facteurs géographiques**

- 1 – Situation et relief
- 2 – Aperçu géologique
- 3 – Géomorphologie
- 4 – Sols
- 5 – Couverture végétale
- 6 – Réseau hydrographique

Chapitre 2 : **Facteurs climatologiques**

- 1 – Généralités sur le climat
- 2 – Equipement du bassin au point de vue météorologique
- 3 – Vents
- 4 – Températures
- 5 – Humidité relative
- 6 – Evaporation et évapotranspiration
- 7 – Précipitations
- 8 – Influence des facteurs climatologiques sur l'écoulement

Deuxième partie : **ANALYSE DES DONNEES HYDROLOGIQUES**

Chapitre 3 : Présentation de l'analyse

- 1 – Données disponibles
- 2 – Méthodologie de l'analyse

Chapitre 4 : Généralités

- 1 – Equipement du bassin au point de vue hydrologique
- 2 – Jaugeages

Troisième partie : **SYNTHESE DES REGIMES HYDROLOGIQUES**

Chapitre 5 : Apports annuels et leurs distributions mensuelles

- 1- Apport annuel
- 2- Distribution mensuelle

Chapitre 6 : Crues

- 1 – Caractéristiques des crues
- 2 – Estimation des débits maximums des crues
- 3 – Impact environnemental sur les crues

Chapitre 7 : Basses eaux

- 1 – Etude statistique
- 2 – Débits caractéristiques
- 3 – Répartition spatiale des débits minima
- 4 – Rapports du débit minimal journalier au module

Chapitre 8 : Débits solides

Chapitre 9 : Grandes unités naturelles hydrologiques : régimes des lieux

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABBREVIATIONS

A : coefficient psychrométrique

(a) : station Tana SCM

a_i : côtes des courbes de niveau

(b): station Ivato Aéroport

B : valeur régionalisée

B.C : *BLANEY-CRIDDLE*

B_{moy} : valeur régionalisée moyenne

B_{pond} : valeur régionalisée pondérée

BPPA : Bureau du Projet de la Plaine d'Antananarivo

B.V: Bassin versant

C : coefficient de ruissellement

°C: degré Celsius

C_v : coefficient de variation

D : *déficit d'écoulement*

DCC : Débit caractéristique de crue

DCE : Débit caractéristique d'étiage

DC11 : Débit caractéristique de 11 mois

DC9 : Débit caractéristique de 9 mois

DC6 : Débit caractéristique de 6 mois

DC3 : Débit caractéristique de 3 mois

DC1 : Débit caractéristique de 1 mois

D_d : densité de drainage

De : Déficit d'écoulement

D_m : Dénivelée

e: tension de vapeur actuelle

ea : Energie advective

E.E.M: Electricité et Eau de Madagascar

ETP : évapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

e_w : tension de vapeur saturante à la température T_w

F : fréquence

f_a : tension de vapeur existante effectivement dans l'air ambiant

F_{te} : tension de vapeur saturante à la température de l'eau en surface,

H : lame éculée moyenne inter annuelle

H (humide) : lame décennale humide

H(sèche) : lame décennale sèche

H_{max} : Altitude maximale

H_{min} : Altitude minimale

H_{moy} : Altitude moyenne

H.T.C : haute terre centrale

H_1 : altitude de la source

H_n : altitude de l'exutoire

$H_{5\%}$: Altitude à 5% de la surface

$H_{95\%}$: Altitude à 95%

I : pente moyenne en [m/m]

I_g : Indice global de la pente

I_p : Indice de pente de ROCHE

I_r : La pente moyenne du cours d'eau

Ig: perméabilité du sol

K : constante

K_c : le coefficient de forme ou de GRAVELIUS

Kc : coefficient cultural

K_e : coefficient d'écoulement

K_3 : coefficient d'irrégularité

Ki : rapport entre le débit annuel i et le débit moyen inter annuel

L : longueur du rectangle équivalent

l : largeur du rectangle équivalent

L_c : la longueur le plus long du cours d'eau

L_e : longueur du cours d'eau [km]

n : rang des débits moyens journaliers

N : nombre de l'échantillon

p : périmètre du bassin versant

P : Pluie moyenne annuelle en [mm]

P_a : pression de l'air au niveau de la station

P_A : pluie annuelle tombée sur le bassin [mm]

\bar{P} : la moyenne arithmétique des pluies

P_h : hauteur de pluie maximale journalière de période de retour T [mm]

P_i : précipitation de chaque année i

P-M: PENMAN-MONTEITH

P_T : pluie maximale de 24 heures pour la même période de retour

P_2 : correspond aux pluies de retour 2 ans

P_{100} : correspond aux pluies de retour 100 ans

P_{50} : correspond aux pluies de retour 50 ans

P_{10} : correspond aux pluies de retour 10 ans

P_5 : correspond aux pluies de retour 5 ans

q : débit spécifique

Q_A : débit annuel [m^3/s]

Q_{aval} : Débit en aval

Q_{amont} : Débit en amont

Q_c : la valeur de débit calculée

Q_F : Débit interannuel de la station de Bevomanga

Q_i : débit relatif à l'année i

Q_j : débits moyens journaliers

Q_J : débit mensuel

$q_{réf}$: débit de référence qui est égale à 0,018

\bar{Q} : la moyenne arithmétique des débits

Q_{max} : débits maximum

Q_f : les débits fréquentiels

Q_t : Débit de crue de période de retour T (m³/s)

q^* : rapport entre les débits et les surfaces du bassin

$Q_{j\min}$: débit journalier « charnière » correspondant au débit de base du début de vidange des réservoirs du bassin

Q_0 : débit journalier au début d'observation

$q_{j\min}$: débit journalier minimal spécifique médian

R_d [m³/s] : estimation des réserves drainées en année moyenne

R_n : Energie radiative

R^2 : coefficient de correlation

R : coefficient de détermination

RFU: Réserve facilement utilisable

R_J : coefficient de répartition à chaque mois

S : surface du bassin versant

S.R: station de référence

T : durée de jour séparant l'observation des débits journaliers Q_0 et $Q_{j\min}$

t_c : temps de concentration

T_c : durée caractéristique de drainage correspond à la division par deux de débit de base [en jour].

T° : Température moyenne annuelle en [°C]

t_e : température de l'eau

Th : Thornthwaite

T_s : température du thermomètre sec

T_u : TURC

T_w : température du thermomètre mouillé

U.S.A: United States of America

Z_m : Z50% de la courbe hypsométrique [m]

(zcit) : zone de convergence intertropicale

β_i : fonction de la surface totale du B.V comprise entre les côtes a_i et a_{i-1}

x_i : distance entre a_i et a_{i-1}

ε : Humidité relative

Θ : écart psychrométrique

λ : constante dépendante de T°

σ : écart-type

γ_1 : coefficient d'asymétrie

γ_2 : coefficient d'aplatissement

μ : constante relative aux caractéristiques du bassin

α : coefficient de tarissement

(1) : station d'Ambohimanambola

(3) : station de Bevomanga

(1') : station d'Andramasina

(2') : station d'Ambatofotsy

(3') : station d'Ampitatafika

(1'') : station de Behenjy

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Valeurs des caractéristiques physiques. (p.25)

Tableau n°2 : Valeurs des caractéristiques hypsométriques. (p.26)

Tableau n°3 : Influence de la couverture végétale sur l'écoulement. (p.36)

Tableau n°4 : Valeur des températures moyennes de Tana SCM. (p.46)

Tableau n°5 : Valeur des températures moyennes de l' Ivato aéroport (p.46)

Tableau n°6 : Valeur des températures minimum et maximum absolue de Tana SCM. (p.46)

Tableau n°7 : Valeur des températures minimum et maximum absolue de l' Ivato aéroport. (p.47)

Tableau n°8 : Températures moyennes et températures minimum et maximum absolue des dix stations de la zone. (p.47)

Tableau n°9 : Valeurs caractéristiques de l'humidité relative. (p.53)

Tableau n°10 : Valeurs de l'ETP moyenne de la station de Tana SCM par les différentes méthodes. (p.57)

Tableau n°11 : Valeurs de l'ETP moyenne de la station de l'Ivato aéroport par les différentes méthodes. (p.57)

Tableau n°12 : Caractéristiques pluviométriques mensuels de Tana SCM. (p.61)

Tableau n°13 : Caractéristiques pluviométriques mensuels de l'Ivato aéroport. (p.61)

Tableau n°14 : Caractéristiques statiques des précipitations à Tana SCM. (p.63)

Tableau n°15 : Caractéristiques statiques des précipitations à Ivato aéroport. (p.64)

Tableau n°16 : Caractéristiques pluviométriques annuels de Tana SCM:.. (p.65)

Tableau n°17 : Caractéristiques pluviométriques annuels de l'Ivato aéroport. (p.65)

Tableau n°18 : Principal caractéristique pluviométrique d'une série dans les stations de référence. (p.66)

Tableau n°19 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Gauss. (p.67)

Tableau n°20 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Galton. (p.67)

Tableau n°21 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Gumbel. (p.67)

Tableau n°22 : Résultats statistiques des pluies maxima de 24 heures de période de retour différente selon Gauss. (p.68)

Tableau n°23 : Résultats statistiques de la pluie maximum de 24 heures de période de retour différente selon Galton. (p.68)

Tableau n°24 : Résultats statistiques de la pluie maximum de 24 heures de période de retour différente selon Gumbel. (p.68)

Tableau n°25 : Bilan annuel calculé dans la station Tana SCM. (p.69)

Tableau n°26 : Bilan annuel calculé dans la station Ivato. (p.69)

Tableau n°27 : Bilan annuel calculé dans le bassin. (p.69)

Tableau n°28 : Bilan hydrique du bassin. (p.70)

Tableau n°29 : Principales caractéristiques des apports annuels. (p.20)

Tableau n°30 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss (Ikopa). (p.80)

Tableau n°31 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Ikopa). (p.80)

Tableau n°32 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Ikopa). (p.81)

Tableau n°33 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss (Sisaony). (p.81)

Tableau n°34 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Sisaony). (p.81)

Tableau n°35 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Sisaony). (p.81)

Tableau n°36 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss(Andromba). (p.82)

Tableau n°37 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Andromba). (p.82)

Tableau n°38 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Andromba). (p.82)

Tableau n°39 : Répartition spatiale des apports annuels et différentes paramètres. (p.83)

Tableau n°40 : Valeurs régionalisée B de différentes stations et leurs apports annuels (CTGREF). (p.85)

Tableau n°41 : Apports annuels du bassin de l'lkopa à Farahantsana (CTGREF). (p.85)

Tableau n°42 : Apports annuels selon les méthodes analogues (p.87)

Tableau n°43 : Coefficients de répartition saisonnière des stations du bassin. (p.88)

Tableau n°44 : Débits moyens mensuels correspondant aux coefficients de répartition saisonnière calculés. (p.89)

Tableau n°45 : Coefficients de répartition saisonnière donnée par « Fleuve et rivière de Madagascar » (p.89)

Tableau n°46 : Débits moyens mensuels correspondant au coefficients de répartition saisonnière donnée par « Fleuve et rivière de Madagascar » (p.89)

Tableau n°47 : Valeurs statistiques des apports mensuels de l'lkopa à Ambohimanambola. (p.90)

Tableau n°48 : Valeurs statistiques des apports mensuels de l'lkopa à Bevomanga. (p.90)

Tableau n°49 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à Andramasina. (p.90)

Tableau n°50 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à Ambatofotsy. (p.91)

Tableau n°51 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à Ampitatafika. (p.91)

Tableau n°52 : Valeurs statistiques des apports mensuels d'Andromba à Behenjy. (p.91)

Tableau n°53 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GAUSS (lkopa). (p.94)

Tableau n°54 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GALTON (lkopa). (p.94)

Tableau n°55 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (lkopa). (p.94)

Tableau n°56 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de Gauss (Sisaony et Andromba). (p.95)

Tableau n°57 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba). (p.95)

Tableau n°58 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba). (p.96)

Tableau n°59 : Valeurs de temps de concentration de chaque rivière d'après les formules empiriques. (p.97)

Tableau n°60 : Valeurs caractéristiques des débits de crues de 1969/1970. (p.98)

Tableau n°61 : Valeurs caractéristiques des débits de crues de 1992/1993. (p.98)

Tableau n°62 : Valeurs caractéristiques des débits de crues de 1995/1996. (p.99)

Tableau n°63 : Coefficient de ruissellement moyen. (p.100)

Tableau n°64 : Coefficient de ruissellement calculé à partir des débits de crues de fréquences différentes. (p.101)

Tableau n°65 : Rapport des valeurs de q^* . (p.101)

Tableau n°66 : Valeur des débits maximum de crue d'après les estimations par formules (p.103)

Tableau n°67 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GAUSS (Ikopa). (p.105)

Tableau n°68 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GALTON (Ikopa). (p.105)

Tableau n°69 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GUMBEL (Ikopa). (p.106)

Tableau n°70 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GAUSS (Sisaony et Andromba). (p.106)

Tableau n°71 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GALTON (Sisaony et Andromba). (p.106)

Tableau n°72 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba). (p.106)

Tableau n°73 : Débits caractéristiques de 1968/1969. (p.107)

Tableau n°74 : Débits caractéristiques de 1995/1996. (p.107)

Tableau n°75 : Débits caractéristiques de 1980/1981. (p.108)

Tableau n°76 : Débits caractéristiques de 1994/1995. (p.108)

Tableau n°77 : Débits caractéristiques de 1968/1969. (p.108)

Tableau n°78 : Débits caractéristiques de 1980/1981. (p.108)

Tableau n°79 : Débits caractéristiques de 1994 à 1996. (p.108)

Tableau n°80 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents d'après « Le fleuve et rivière de Madagascar ». (p.110)

Tableau n°81 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Gauss. (p.111)

Tableau n°82 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Galton(p.111)

Tableau n°83 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Gumbel. (p.112)

Tableau n°84 : Rapport du débit spécifique d'étiage et de l'apport annuel. (p.113)

Tableau n°85 : Grandes unités naturelles hydrologiques. (p.116)

LISTE DES FIGURES

Figure n°1 : Plan de situation (p.23)

Figure n°2 : Carte du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.23)

Figure n°3 : Carte géologique du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.24)

Figure n°4 : Carte géomorphologique du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.31)

Figure n°5 : Carte de la couverture végétale du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.37)

Figure n°6 : Carte des réseaux hydrographiques du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.39)

Figure n°7 : Carte des stations climatiques du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.42)

Figure n°8 : Ecart entre les températures moyennes mensuelles de juin et de janvier sous diverses latitudes (p.48)

Figure n°9 : Variation de la température avec l'altitude (p.49)

Figure n°10 : Carte isotherme du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.50)

Figure n°11 : Courbe de variation mensuelle de l'ETP de Tana SCM (p.59)

Figure n°12 : Courbe de variation mensuelle de l'ETP de l'Ivato aéroport(p.60)

Figure n°13 : Carte des stations hydrologiques du bassin versant supérieur de l'Ikopa (p.75)

Figure n°14 : Courbe chronologique des débits moyens annuels de Bevomanga (p.78)

Figure n°15 : Courbe chronologique cumulée de Bevomanga (p.78)

Figure n°16 : Débit moyen mensuel classé d'après leur fréquence au dépassement (Bevomanga) (p.92)

Figure n°17 : Débit spécifique minimal journalier en fonction de la lame écoulée(p.113)

Figure n°18 : Répartition spatiales des caractéristiques du bassin(p.116)

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : RELIEF

- 1- Surface du B.V supérieur de l'Ikopa selon les réseaux hydrologiques
- 2- Courbes hypsométriques

Annexe 2 : VENTS

- 1- Données sur les vents
- 2- Diagramme représentant la variation des vents

Annexe 3 : TEMPERATURES

- 1- Valeurs des températures des dix stations
- 2- Diagramme représentant la variation de la température

Annexe 4 : HUMIDITE RELATIVE

- 1- Démonstration du calcul de l'humidité relative
- 2- Valeur de l'humidité relative
- 3- Courbe de variation
- 4- Règle à calculer

Annexe 5 : ETP

- 1- Développement théorique selon cinq méthodes
- 2- Calcul de l'ETP selon cinq méthodes
- 3- Courbes de variation mensuelle de l'ETP pour les stations de références

Annexe 6 : PRECIPITATION

- 1- Valeurs de la précipitation pour les stations de références
- 2- Calcul de l'ajustement aux lois

Annexe 7 : DONNEES DISPONIBLES

- 1- Données brutes sur les débits
- 2- Données reconstituées

Annexe 8 : APPOINT ANNUEL 1

- 1- Courbes chronologiques
- 2- Calcul de l'ajustement aux lois
- 3- Graphique d'ajustement

Annexe 9 : APPOINT ANNUEL 2

- 1- Calcul des valeurs régionalisées B
- 2- Calcul des coefficients de répartition R
- 3- Calcul des coefficients d'hydraulicité
- 4- Courbes des débits moyens mensuels classés d'après leur fréquence de dépassement

Annexe 10 : CRUES

- 1- Données sur les crues
- 2- Calcul d'ajustement aux lois
- 3- Calcul d'estimation de débit de crues
- 4- Hydrogramme de crues

Annexe 11 : BASSES EAUX

- 1- Données sur les basses eaux
- 2- Calcul d'ajustement aux lois
- 3- Débits caractéristiques

INTRODUCTION

La première étude sur la monographie hydrologique du B.V supérieur de l'lkopa a été réalisée par CAMUS en 1953, et a été renouvelé par ALDEGHERI au sein de l'ORSTOM 15 ans après. Ensuite, l'œuvre intitulé « Fleuve et rivière de Madagascar » montre globalement quelques parties sur l'hydrologie du B.V supérieur de l'Kopa, qui s'arrêtera aux études des données de 1980. Et enfin, une étude d'aménagement du B.V dominant la plaine d'Antananarivo a été aussi faite par des bureaux d'étude à la demande de la BPPA.

Ainsi, des travaux dont le chiffre actuel dépasse la centaine de milliards de francs Malagasy sont actuellement en cours. Et le dimensionnement retenu pour les divers aménagements résulte toutefois de ces études précédentes. Il est donc opportun de vérifier tout d'abord si l'évolution de l'état du B.V concerné et l'hydroclimatique depuis cette période n'ont pas abouti à des modifications qui mettraient en question le dimensionnement des futurs ouvrages.

Comme nous le savons, la plaine d'Antananarivo était souvent inondée et quelque fois des ouvrages sont détruites, entre autre, des aménagements pourraient être nécessaires sur certains sites.

Par suite, pour assurer la protection de ces ouvrages et pour réussir tous aménagements dans le bassin, la présente étude a été élaborée en vue de mettre en évidence l'évolution de l'état du bassin et son régime hydrologique avec des informations complémentaires et récentes.

Pour ce faire, les facteurs conditionnels des régimes seront énoncés dans la première partie et l'analyse des données hydrologiques concerne la seconde partie. Et enfin, la troisième partie évoquera la synthèse des régimes hydrologiques.

PARTIE I

FACTEURS CONDITIONNELS DES REGIMES HYDROLOGIQUES

Première partie : FACTEURS CONDITIONNELS DES REGIMES HYDROLOGIQUES

Chapitre I. FACTEURS GEOGRAPHIQUES

1. SITUATION ET RELIEF

1.1 Situation

Le bassin versant supérieur de l'Ikopa s'étend sur une superficie de 4290 km²¹, et est limité au Nord-Est par le lac de Mantasoa, au Sud-Est par le lac de Tsiazompaniry, au Sud-Ouest par le massif d'Ankaratra, et enfin au Nord-Ouest par la station de Bevomanga. Cette surface tient compte le bassin situé en amont du barrage de Mantasoa. Si l'on avance l'Ikopa de Bevomanga à Farahantsana, la superficie serait 4384 km²².

1.1.1- Délimitation géographique

D'après les coordonnées géographiques, on le trouve entre la latitude 18°41 et 19°31 Sud et la longitude 47°14 et 47°55.

Le bassin en question comporte une vingtaine de sous bassins ou bassins élémentaires. Concernant ces derniers, on peut les classer en quatre parties telles :

- La partie Est où l'on rencontre les bassins versants des Varahina et leurs affluents. De ce côté, on trouve le grand réservoir de Mantasoa, qui a pour vocation initiale de soutenir les étiages, pour alimenter l'irrigation et production hydroélectrique. Et le réservoir de Tsiazompaniry, qui a pour but de laminer les crues et régulariser les débits d'étiage.
- La zone centrale Nord et Sud-Est englobe les bassins versants les plus proche de la plaine d'Antananarivo, qui ont une influence le plus rapide sur la ville et la grande plaine d'Antananarivo. On peut la diviser comme suit : l'Ikopa en amont d'Antananarivo, Ikopa aval, et enfin, Ikopa et ses affluents dominants directement Antananarivo.

¹ Bibliographie 9

² Traitement sur Mapinfo

- La zone médiane Sud correspond aux bassins versants de la Sisaony délimitée au Nord d'Ambatolampy, et au sud d'Andramasina jusqu'à Ambohidratrimo.
- Et, enfin, la zone Ouest du massif d'Ankaratra et les bassins versants de l'Andromba. Cette dernière est limitée au Sud par le massif d'Ankaratra même et à l'Est par la ville d'Imerintsiatosika jusqu'au confluent avec l'Ikopa.

La situation du bassin versant de l'Ikopa se trouve dans la figure n°1 de la page suivante¹.

1.1.2- Délimitation administrative²

Le bassin versant de l'Ikopa s'étend sur huit Fivondronana du Faritany d'Antananarivo, à savoir :

Les 6 Firaiana sur 6 d'Antananarivo Renivohitra et les 24 sur 24 de celui d'Antananarivo Atsimondrano sont totalement intégrés dans le bassin.

Tandis que pour l'Antananarivo Avaradrano et l'Andramasina, les Firaiana sont quasi intégralement compris dans le bassin, tel que :

- Pour l'Antananarivo Avaradrano, il existe 32 Firaiana : 22 sont intégrés dont 3 sont partiellement compris dans le bassin.
- Pour l'Andramasina il existe 9 Firaiana : 9 sont intégrés dont 2 sont partiellement compris dans le bassin.

Ensuite, pour les 4 derniers Fivondronana, on les rencontre partiellement dans le bassin en se distinguant comme suit :

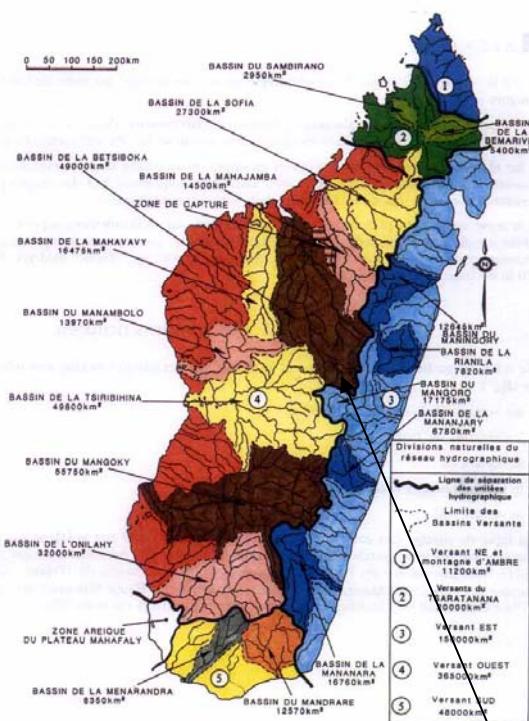
- Ambohidratrimo : il y a 22 Firaiana dont 16 se trouvent dans le bassin avec 4 Firaiana partiellement intégrés.
- Arivonimamo compte 16 Firaiana: 11 se situent dans le bassin dont 8 partiellement.
- Ambatolampy : 8/17 Firaiana sont intégrés avec 5 y compris partiellement.

¹ source : FTM

² Bibliographie 6

figure 1.9.

Réseau hydrographique
et principaux bassins
fluviaux malgaches



Fleuves

PLAN DE SITUATION

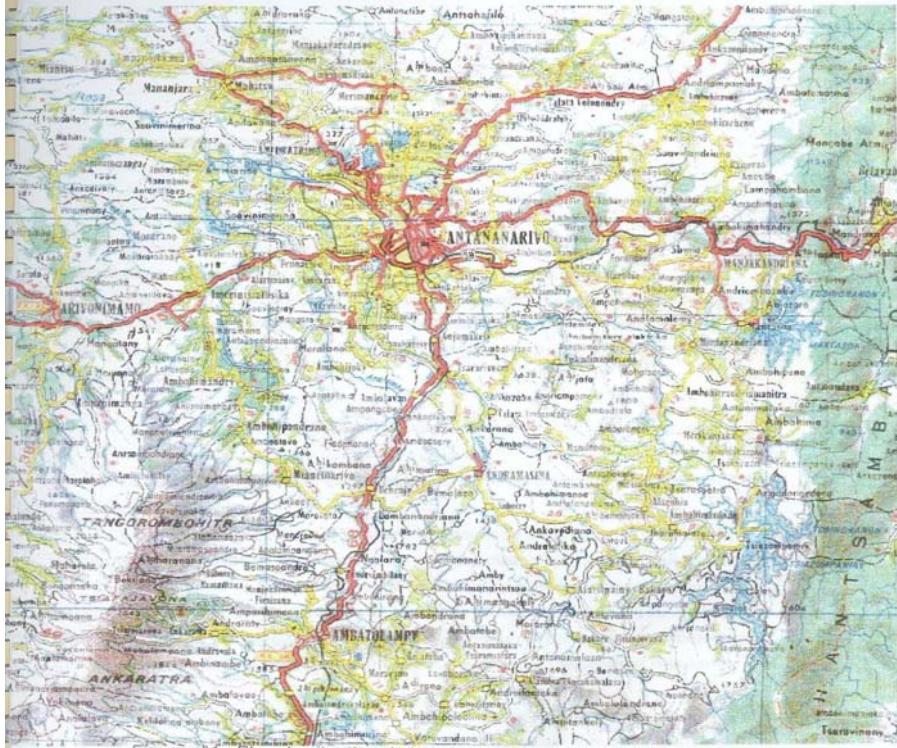


Figure n°1 : Plan de situation du bassin versant supérieur de l'lkopa

- Manjakandriana : 13 dont 8 sont en partie sur 20 Firisana se trouvent dans le bassin.

Par suite, le bassin peut être divisé en 2 grands groupes de Fivondronana :

- Ceux formant la zone du « grand Tana » ; Antananarivo Renivohipitra, Avaradrano, Atsimondrano, Ambohidratrimo.
- Ceux restants forment la périphérie du grand Tana.

Cette distinction permet de mettre en relief, d'une part, le rôle polariseur de la grande agglomération Tananarivienne, premier foyer de peuplement du pays, carrefour de voie de communication, premier marché de consommation du pays et de redistribution vers les autres régions et, d'autre part, le rôle de ceinture d'approvisionnement la plus immédiate joué par la périphérie du grand Tana.

La carte du B.V¹ est présentée dans la page suivante par la figure n°2.

1.2- Relief

1.2.1- Généralité

Le bassin versant supérieur de l'Ikopa est, généralement, constitué par des hautes vallées comme les Varahina Nord et Sud avec une altitude relativement à 1938 m et 1700 m, par une plaine d'Antananarivo, et enfin par des fonds vallées des bassins qui sont intensivement destinés à la riziculture.

En amont du bassin versant de l'Ikopa, on découvre le lac de Mantasoa, qui est localisé à une altitude de 1385 m à 1700 m à l'Est, et de 1600 m au Nord et au Sud. Tandis que le lac de Tsiaziomaniry est situé à 1487 m jusqu'à 1612 m d'altitude².

Pour les principaux affluents de l'Ikopa :

Une grande partie de la surface du bassin de la Mamba se trouve à une altitude de 1300 m environ.

La majeure partie du B.V en amont de la Sisaony est caractérisée par un relief de collines à dénivellés moyens : 30% de sa surface se situe au-dessus de 1500 m et atteint même jusqu'à 1750 m d'altitude.

¹ source : FTM

² Bibliographie 8

CARTE DU B.V SUPERIEUR DE L'IKOPA

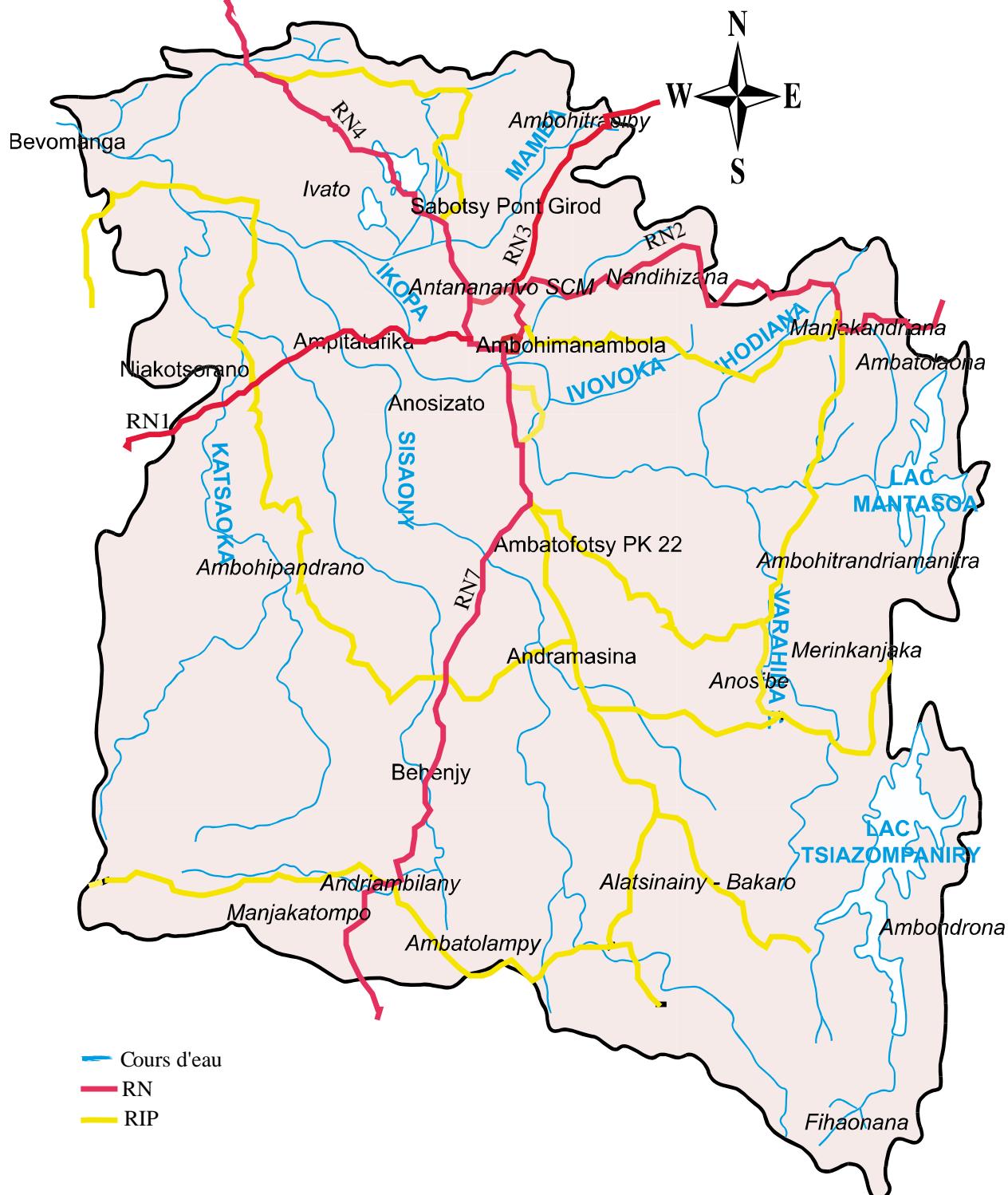


Figure n°2 : Carte du BV supérieur de l'lkopa

L'Andromba comprend une altitude maximale de 2557 m au pied de l'Ankaratra et diminue jusqu'à l'exutoire, à 1256 m environ. On constate que 56% de la surface du bassin de l'Andromba est comprise entre 1400 m et 1600 m d'altitude¹.

D'une manière générale, le bassin de l'Ikopa se situe donc à une altitude un peu élevée : environ à 1200 m.

1.2.2- Caractéristique de forme

Les paramètres physiques du B.V représentent un des principaux facteurs conditionnels de l'écoulement, à savoir :

- la surface S, le périmètre p du bassin
- le coefficient de forme ou de GRAVELIUS K_c :

$$K_c = \frac{p}{2\sqrt{\pi S}}$$

- le rectangle équivalent : la longueur L et la largeur l :

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1,12^2}{K_c}} \right) \text{ si } K_c > 1,12$$

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \text{ si } K_c \leq 1,12$$

$$l = \frac{S}{L} = \frac{p}{2} - L$$

- la longueur le plus long du cours d'eau L_c
- la densité de drainage D_d :

$$D_d = \frac{L_c}{S}$$

¹ Bibliographie 17

Les valeurs relatives à ces caractéristiques physiques afférentes à la présente étude sont consignées au tableau ci-dessous :

| B.V | S [km ²] | p [km] | Kc | L [km] | I [km] | Lc [km] | Dd |
|----------------------|----------------------|--------|------|--------|--------|---------|------|
| Sisaony | 827 | 76,1 | 0,75 | 19,2 | 43,1 | 105 | 0,13 |
| Andromba | 1200 | 110,4 | 0,90 | 27,8 | 43,1 | 102 | 0,09 |
| Ikopa à Bevomanga | 4290 | 394,8 | 1,70 | 48,5 | 88,4 | 161 | 0,04 |
| Ikopa à Farahantsana | 4384 | 403,4 | 1,72 | 48,8 | 89,9 | 172,5 | 0,04 |

Tableau n°1 Valeurs des caractéristiques physiques¹

1.2.3- Hypsométrie

La structure hypsométrique du bassin versant est caractérisée par les paramètres suivants :

- L'altitude maximale H_{max}, l'altitude minimale H_{min}, l'altitude moyenne H_{moy}
- La dénivellation D_m, l'altitude de 5% (H_{5%}) et l'altitude de 95% (H_{95%}) de la surface.

$$D_m = H_{5\%} - H_{95\%}$$
- L'indice global de la pente I_g :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

- L'indice de pente de ROCHE I_p :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})}$$

où β_i : fonction de la surface totale du B.V comprise entre les côtes a_i et a_{i-1}

x_i : distance entre a_i et a_{i-1}

L : longueur du rectangle équivalent

- La pente moyenne du cours d'eau I_r

$$I_r = 100 \frac{H_1 - H_n}{1000 L_c}$$

¹ source : Traitement sur Mapinfo et bibliographie 5

avec H_1 : altitude de la source : 1620m

H_n : altitude de l'exutoire : 1204m

L_c : longueur du cours d'eau.

Les valeurs relatives aux caractéristiques hypsométriques citées supra sont présentées dans le tableau suivant :

| B.V | H_{\max} | H_{\min} | H_{moy} | $H_{5\%}$ | $H_{95\%}$ | D_m | I_g | I_p | I_r |
|----------------------|------------|------------|------------------|-----------|------------|--------|-------|-------|-------|
| Sisaony | 1750 | 1249 | 1499,5 | 1609,0 | 1272,8 | 336,13 | 17,53 | 0,12 | 0,48 |
| Andromba | 2257 | 1256 | 1756,5 | 1943,1 | 1284,1 | 659,0 | 23,69 | 0,14 | 1,25 |
| Ikopa à Bevomanga | 2257 | 1245 | 1751,0 | 1720,4 | 1261,2 | 459,2 | 9,47 | 0,09 | 0,23 |
| Ikopa à Farahantsana | 2257 | 1204 | 1730,5 | 1717,2 | 1224,1 | 493,1 | 10,11 | 0,09 | 0,24 |

Tableau n°2 Valeurs des caractéristiques hypsométriques¹

Les courbes de répartition hypsométriques² relatives à chaque bassin considéré illustrant la structure du relief de la zone en question, sont portées dans l'annexe n°1.

1.2.4- Influence sur l'écoulement

La connaissance du relief permet d'obtenir la variation de l'altitude dans le périmètre étudié, autrement dit, elle permet de déterminer la pente moyenne des réseaux hydrographiques.

Ainsi, suivant la formule de détermination de la vitesse proposée par Chezy, Manning strickler, la valeur de la pente conditionne la vitesse d'écoulement de l'eau en surface. Elle favorise aussi l'importance des débits et la concentration des filets d'eau.

¹ Bibliographie 17 et calcul en Excel

² Traitement d'après Mapinfo

2. APERCU GEOLOGIQUE, GEOMORPHOLOGIQUE

2.1 Caractéristiques géologiques et géomorphologiques

2.1.1- Géologie

Généralement, le bassin versant supérieur de l'Ikopa se repose sur un socle métamorphique ou granitique du précambrien sauf le massif d'Ankaratra qui est de type volcanique.

Les roches sont déterrées à une dizaine de mètres de profondeur suivant une altération et se rapprochent des filons de roches très dures (quartzite, granite intrusif) : ce qui marquent la hauteur des reliefs très élevée. Par ailleurs, des seuils rocheux séparent les sections de la plupart des cours d'eau, et régulent ainsi l'évolution des profils en long comme des nappes phréatiques¹.

En effet, on rencontre dans ce bassin, pour la plupart de la partie, des plaines alluviales, des roches volcaniques, des roches métamorphiques et des granites migmatitiques et migmatites granitoïdes accompagnées des différents types de roches telles que :

- Dans la partie est, il existe le massif de Carion : granite porphyroïde de Carion.
- à l'Ouest, on en trouve des alluvions et des gneiss, ankaratrite nepheline et enfin des migmatites
- au Sud, des migmatites et d'ankaratrite
- au nord, on a des alluvions, des gneiss, ainsi que des charnokites.
- Et la plaine est dominée par des alluvions.

La structure géologique² du bassin est confirmée à la carte géologique (figure n°3) de la page suivante.

¹ Bibliographie 1

² source : FTM

CARTE GEOLOGIQUE

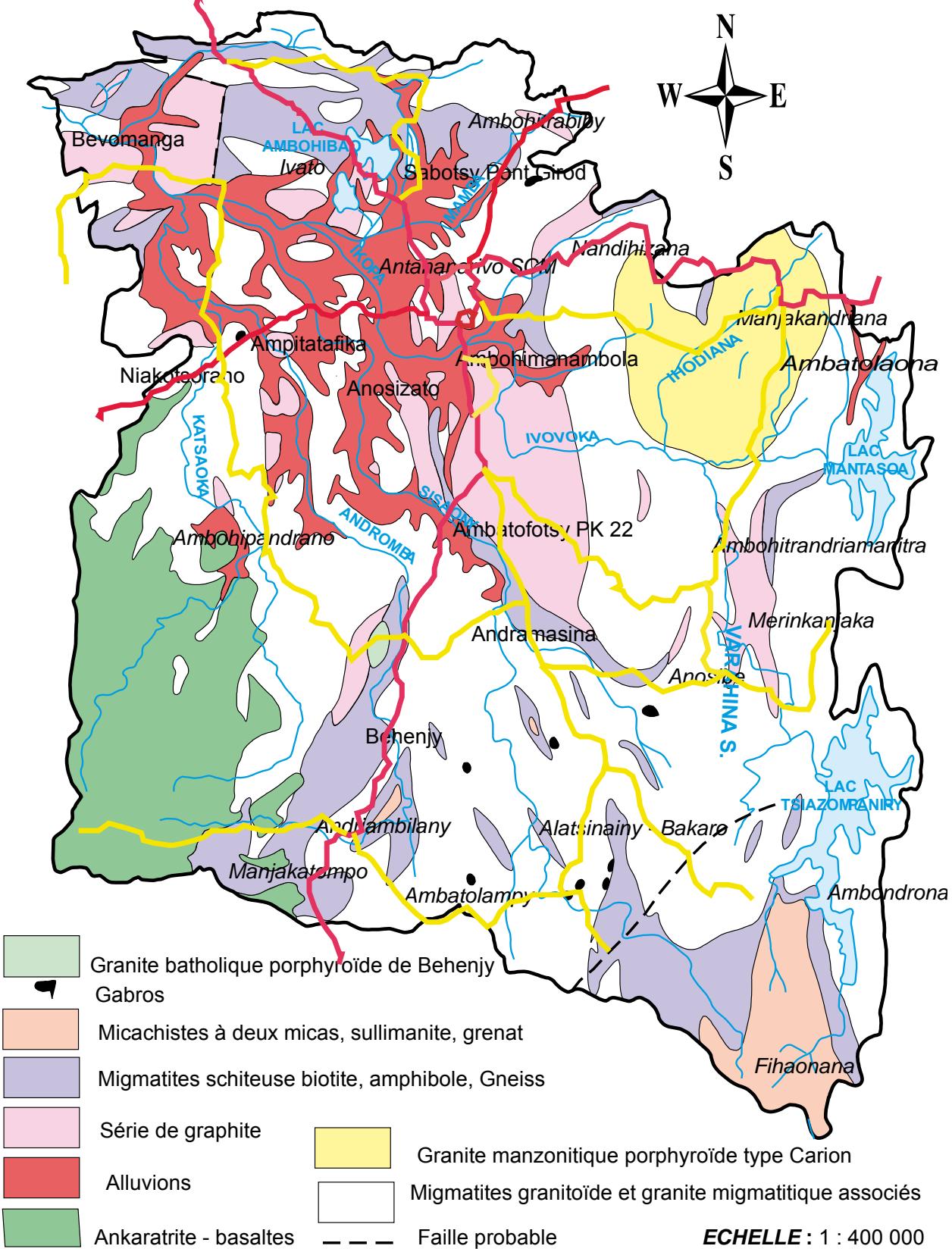


Figure n°3 : Carte géologique du B.V supérieur de l'Ikopa

2.1.2- Géomorphologie

On découvre, sur les hauts plateaux, des massifs volcaniques tertiaires et quaternaires. Ainsi, le bassin versant maintient les terroirs de trois surfaces d'aplanissement qui ont accompagné au cours de la fin de l'aire tertiaire du précambrien et jusqu'au quaternaire (à une altitude de 1200m à 1800m), une profonde altération des roches. En effet, ces surfaces d'aplanissement couvrent à peu près les trois quarts du bassin en question. Elles sont caractérisées par la topographie typique en collines arrondies, les reliefs résiduels associés aux roches résistantes à l'altération, un réseau hydrographique drainant de large bas fonds¹.

Sur ce plateau, on en trouve des plateaux ondulés et basses collines aplaniées, des collines sur un socle métamorphique et granitique altéré et aussi des hautes collines et relief montagneux sur sols cristallins.

En effet, les plateaux ondulés occupent une surface de l'ordre de 2000 ha et sont séparés du réseau hydrographique. Ce dernier les isole par des dénivelées moyennes de 20 à 50 m avec un réseau de larges de bas fonds aménagés en rizières². Et ils correspondent aux surfaces d'aplanissement relativement récentes et bien conservées et certains sont soutenus en glacis à des hautes collines qui les dominent.

Concernant les basses collines aplaniées, elles sont constituées d'une forme de relief intermédiaire entre les plateaux ondulés et les collines proprement dites. Elles se différencient par la plus faible extension de surfaces planes en sommets et le réseau de larges bas fonds qui se développe entre ces collines aplaniées par rapport aux plateaux ondulés.

Pour les collines, le réseau hydrographique est moyennement dense avec des bas fonds étroits séparés par des sections étroites où les cours d'eau s'encaissent

Enfin, les hautes collines sont généralement associées à des roches cristallines ou métamorphiques dures en intrusions de formes allongées. Celles –ci dominent un paysage de surface d'aplanissement plus ou moins remaniés en tanety, et caractérisent la dernière constitution.

Par suite, la grande plaine d'Antananarivo est expliquée comme une zone d'effondrement tectonique qui fut lacustre au quaternaire ancien et progressivement

¹ Bibliographie 8

² Bibliographie 6

remblayée. Cette grande plaine comprend ainsi des vallées alluviales et colluviales, basses terrasses qui accumulent les sites géomorphologiques suivant : plaine d'inondation, levées de berge, alluvions complexes des vallées étroites, vallées colluviales, cuvette de décantation et tête de source. La presque totalité de celle-ci a été aménagée en rizicultures et souvent depuis plusieurs siècle, modifiant ainsi les cycles hydrologiques et de transfert des sédiments.

Puis, on rencontre d'abord le bassin versant amont de la Sisaony siégé sur un socle précambrien, avec un réseau hydrographique encaissé et dépourvu de bas fonds. A part les unités géomorphologiques cités ci-dessus, le bassin de Sisaony comprend ainsi des affleurements rocheux. Ces derniers sont localisés sur les crêtes des hautes collines et associés à des roches de type granites ou quelque fois des roches métamorphiques quartzites en filons. Ces zones sont le siège de ruissellements important dont une partie est absorbée par les nappes caillouteuses qui s'étendent fréquemment aux pieds de ces affleurements.

Enfin, il existe le massif d'Ankaratra de type volcanique ancien, avec des plateaux basaltiques de composition différente. Du point de vue hydrogéologique, on en trouve des roches fissurées et perméables, ses niveaux de source affleurent au contact des couches imperméables. De même, les unités géomorphologiques des trois sites énumérés supra y sont incluses en dehors des cultures en terrasses et des plateaux basaltiques qui sont associés à des coulées basaltiques de roche dure, des versants de l'Ankaratra qui est relativement complexe, reflétant l'alternance de coulées basaltique dures et de formations intercalaires plus tendres.

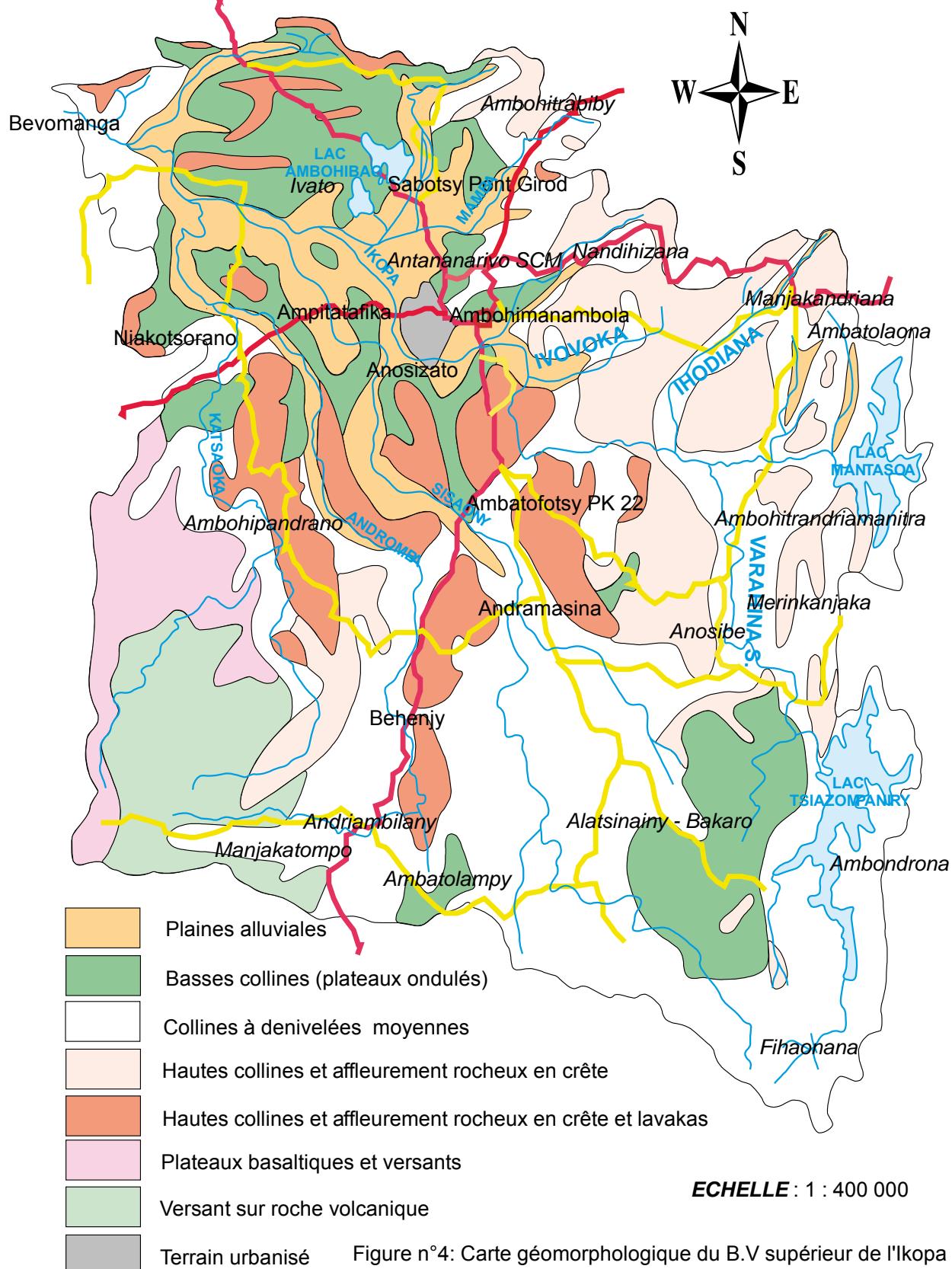
La structure géomorphologique¹ du bassin s'illustre dans la carte géomorphologique (figure n°4) de la page suivante.

2.2 Influence sur l'écoulement

L'étude géologique et géomorphologique du sol a pour objet de les classer d'après leur perméabilité, celle ci intervient en premier lieu sur la rapidité de montée des crues et le soutien rapporté aux débits d'étiage par les nappes souterraines. Ainsi, notre bassin versant se compose comme suit par nature géologique des terrains :

¹ Bibliographie 6

CARTE GEOMORPHOLOGIQUE



3. SOLS

3.1 Caractéristiques

La pédologie du bassin versant supérieur de l'Ikopa a été effectuée par les géologues, pédologues de l'ORSTOM. On observe quelques variétés de sols dans ce bassin. Généralement, 9/10 de l'île Madagascar est composée de latérite. Ainsi le bassin est formé par les 3 catégories des sols suivants¹ :

- les sols ferralitiques
- les sols peu évolués, ranchers ou sableux, et des sols peu évolués alluviaux
- une petite partie de sol hydromorphe

En effet, la presque totalité du bassin est occupée par des sols ferralitiques dus à l'altération ancienne des roches mères, à l'exception des sols alluviaux hydromorphe, et, est caractérisé par leur pauvreté en bases (calcium, potassium, magnésium, phosphore).

3.1.1- les sols ferralitiques

Comme on a déjà énoncé que le sol est dominé par les sols ferralitiques, ceux-ci sont fonction des conditions climatiques locales, que ce soit sols ferralitiques typiques ou sols faiblement ferralitiques.

3.1.2- les sols peu évolués

Les sols les plus répandus dans le bassin sont de la catégorie des sols alluviaux tels que les sols alluviaux sablo-limoneux et les sols alluviaux limono-argileux.

3.1.3- les sols hydromorphe

Ce sont des sols limono-argileux gris à gris noir, dont l'hydromorphie est liée à la présence d'une nappe phréatique peu profonde, affleurant en surface lors de la saison des pluies, leur réaction est toujours acide pH ≈ 5.

¹ Bibliographie 1

On peut subdiviser les sols dans le bassin comme suit :

- La plaine est dominée par des sols hydromorphes aménagés en rizières qui sont localement organiques et tourbeux. Tandis que les sols peu évolués d'apport, non hydromorphes, sont rares et se limitent à la partie des berges. Les sols faiblement ferralitiques de basses terrasses sont apparues de très peu.
- Les plateaux ondulés et basses collines se sont distinguées par les sols ferralitiques, rouges, à texture moyenne, fortement déssaturés en bases.
- Les collines à sols ferralitiques déssaturés avec une texture moyenne remaniés sur les parties en forte pente.
- On trouve fréquemment des lithosols et sols peu évolués sur les sommets des hautes collines et relief montagneux. Il existe aussi des sols ferralitiques de pente qui sont très souvent recouvert d'une nappe caillouteuse d'épaisseur irrégulière atteignant parfois 50 cm d'épaisseur et plus.
- Dans la partie des plateaux basaltiques, les sols ont une profondeur et un degré d'évolution très variable : sols ferralitiques rouges argileux, sols bruns parfois caillouteux sur les zones érodées où elle est à faible profondeur avec des sols qui sont en général bien structurés. D'ailleurs des sols ferralitiques humifères et andosols ont été signalés en altitude supérieure à 1800 m.
- Le versant de l'Ankaratra ont des sols rajeunis par l'érosion et qui sont en majorité des andosols bruns, relativement fertiles, malgré la présence des roches souvent élevées et une profondeur très irrégulière.

3.2 Influence sur l'écoulement

La perméabilité de surface et la capacité de rétention en eau du sol favorisent l'infiltration et s'opposent au ruissellement. Le flux d'infiltration dépend de l'état de surface et du système de porosité, eux-mêmes conditionnés par la compacité, la fissuration et l'activité biologique (macrospores, galeries). Sous l'action des pluies, la surface du sol passe d'un état fragmentaire poreux et meuble à un état plus continu et compact. La couche superficielle forme une croûte de battance qui diminue la vitesse d'infiltration donc favorise le ruissellement. Les croûtes de battance se développent surtout sur les sols limoneux : la vitesse d'infiltration peut passer de plusieurs dizaines de mm par heure à moins de 1 mm par heure lorsque s'est formée la croûte de battance ; l'eau ruisselle alors que le sol n'est pas saturé en eau en profondeur.

L'histoire hydrique du sol intervient également : un sol saturé par une précipitation ne pourra absorber la précipitation suivante. La profondeur du sol joue aussi un rôle : un sol peu épais sur une roche imperméable sera une zone de ruissellement favorisée.

D'après les études faites par Aldéguéri dans le cahier OROSTOM pour la région tropicale, les différents coefficients de ruissellement¹ (C) en fonction de la perméabilité du sol sont déterminer comme suit :

- Sol imperméable en surface ou à faible profondeur (20 à 50 cm)

Pour $3 < Ig < 30$, en m/km C: 50 à 60 %

Pour $70 < Ig < 80$, en m/km C : 58 à 70 %

- 30 à 60 % de surface correspondant à un sol imperméable en surface ou à faible profondeur (20 à 50 cm)

C: 30 à 40 %

- Bassin peu perméable en pente faible avec $Ig < 10$ en m/km ; ou bassin ayant moins de 30 % de leur surface imperméable avec $10 < Ig < 30$; ou bassin perméable avec $Ig > 70$

C : 20 à 30 %

- Bassin perméable homogène à assez forte pente avec $20 < Ig < 40$ en m/km ou bassin très perméable à très forte pente avec $Ig > 80$ ou bassin de perméabilité moyenne à pente modérée

C : 10 à 16 %

- Bassin perméable de pente faible à modérée $5 < Ig < 25$ en m/km

C : 7 à 10 %

- Bassin très perméable en surface et en profondeur à pente assez faible $Ig < 10$ en m/km C : 3 à 5 %

En ce qui concerne le bassin d'étude, les coefficients de ruissellement y afférents seront repris dans le chapitre VI.2.

¹ Bibliographie 2

4. COUVERTURE VEGETALE

4.1 Caractéristiques

La végétation est un des paramètres essentiels pour le cycle de l'eau, en raison de l'infiltration, du ruissellement de l'eau. C'est à dire le recyclage de l'eau dépend de la couverture végétale du sol. Dans le bassin versant supérieur de l'Ikopa, l'occupation des sols est très variable selon leur situation.

Des reboisements récents et anciens occupent presque la totalité de la partie nord-Est. Il existe aussi quelques rizières et cultures de tanety ; et ainsi un peu de forêt naturelle et des reboisements très anciens du côté sud-est¹. Par ailleurs les forêts naturelles s'installent en totalité à l'extrême sud-est du bassin et repartissent sur une surface de 3000 ha et leur extension reste inchangée depuis 30 ans.

Dans la partie du massif d'Ankaratra : les gens y pratiquent des cultures de tanety, de quelques rizières et des cultures en terrasses ; à part quelques reboisements récents et anciens.

Entre ces deux parties qu'on vient de citer ci-dessus, des pâturages et des cultures de tanety qu'on y voit généralement jusqu'au centre du bassin.

Dans la plaine de Tana et un peu plus au Nord-Est, les sols sont occupés intensivement par des rizières et des marais, ainsi de quelques cultures de tanety en dehors de la zone urbanisée. Cela est figuré dans la carte de la couverture végétale.

Ainsi des estimations ont été faites sur les données de surfaces concernant la couverture boisée à partir des cartes au 1/100 000 (1962) et une prise de vue au 1/20 000 (1992). Il en résulte que la surface boisée en 1992 est de 38000 ha contre 22000 ha en 1962².

Actuellement, environ 45,5% de la surface reboisée est cantonnée dans la partie Nord-Est et 13,3% de la superficie boisée, des reboisements en extension et un potentiel forestier similaire dans le Sud-Est. Et le reste du bassin versant partage 41,2% de la surface boisée, le quart Sud-Ouest étant très faiblement boisé.

Remarque : On peut rencontrer dans le centre jusqu'au Sud des zones à forte érosion.

¹ Bibliographie 6

² Bibliographie 6

4.2 Influence sur l'écoulement

Suivant des études faites par des chercheurs. L'écoulement varie avec le type des couvertures végétales

| Nature du couvert végétal | Ruisseaulement /Infiltration |
|---------------------------|------------------------------|
| Forêt | 2% |
| Pâturage | 5% |
| Riziculture | 25% |
| Culture de maïs | 50% |

Tableau n°3 : Influence de la couverture végétale sur l'écoulement¹

La culture de maïs n'est autre qu'une des cultures en tanety. Par conséquent, on peut dire que le ruissellement est environ à 50 % d'infiltration.

La carte de la couverture végétale² (figure n°5) de la page suivante présente la répartition de la couverture végétale du B.V.

5. RESEAU HYDROGRAPHIQUE³

L'Ikopa est formé par la réunion de Varahina Nord et de Varahina Sud.

Concernant le Varahina Nord qui venait de la partie de Manjakandriana et Ambatolaona en passant par le lac de Mantasoa. Elle a une longueur environ 14 km (Est – Ouest) avec une pente moyenne de 3,5 m/km. Elle comprend aussi un bassin versant élémentaire d'une superficie de 259 km² se trouvant à une altitude de 1938 m. Le barrage de Mantasoa, depuis 1956, alimente, par la digue d'Ampasimotsy, la centrale hydroélectrique de la Mandraka. Les eaux de ce bassin sont ainsi utilisées sous 250 m de chute au lieu de 36 m aux usines d'Antelomita.

¹ Bibliographie 18

² Bibliographie 5

³ Bibliographie 9

COUVERTURE VEGETALE

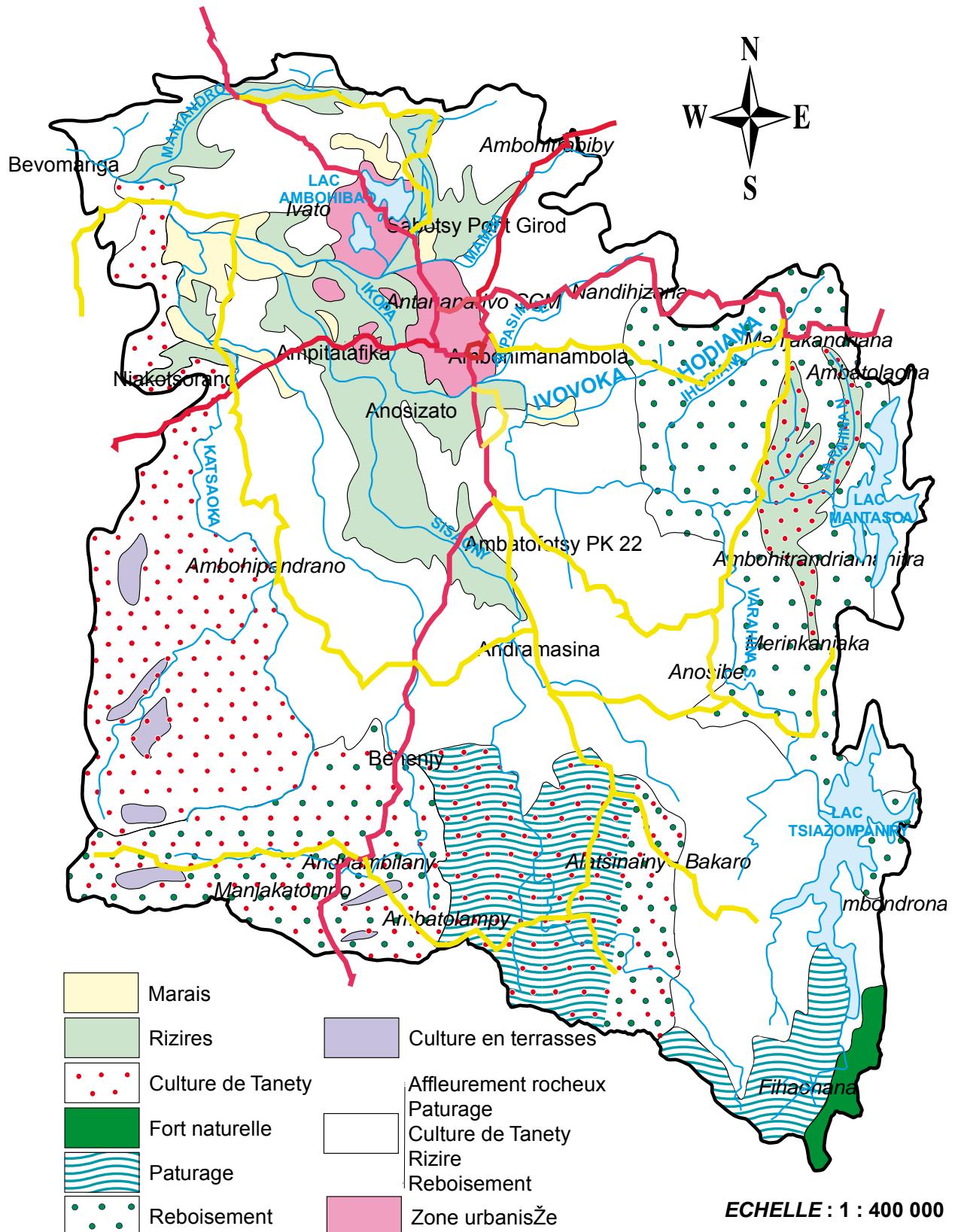


Figure n°5: Carte de la couverture végétale du B.V supérieur de l'Ikopa

Pour le Varahina sud descendant de Fihaonana en passant par le lac de Tsiaziompaniry, la rivière mesure 90 km avec une surface de bassin de 791 km², et se déverse du Sud a l'Ouest à une pente de 4,35 m/km.

Et, les deux rivières se rejoignent pour former l'lkopa et le lieu de cette confluence des deux Varahina se situe à 6 km en amont de la chute d'Antelomita qui ce dernier est équipé de deux centrale électriques. A partir de cela, l'lkopa descend en direction Est–Ouest sur 20 km dans un lit relativement encaissé, avec une pente moyenne de 2 m/km jusqu'à Ambohimanambola. Puis l'lkopa entre dans la plaine d'Antananarivo à la pente très faible de l'ordre de 0,25 à 0,13 m/km et continue pendant 45 km jusqu'à la station de Bevomanga.

L'lkopa a trois principaux affluents qui les rejoignent dans la plaine, tels que la Sisaony et l'Andromba grossie de la Katsoaka de la rive gauche et la Mamba de la rive droite.

La Mamba se trouve à une altitude de 1375 m avec une pente moyenne de 0,13 m/km et une superficie de 282 km².

La Sisaony a une longueur de 100km environ avec une pente moyenne de 1,34 m/km. Et son bassin versant élémentaire mesure 827 km² et se trouve à une altitude de 1500 m.

Enfin, l'Andromba et la Katsoaka se rejoignent pour donner la rivière Andromba de 102 km de longueur jusqu'à sa confluence avec l'lkopa, et le bassin a une superficie de 1200 km², et une altitude de 1600 m, sa pente est de 2,88 m/km.

Et, nous montrons dans la page suivante la carte des réseaux hydrographiques¹ (figure n°6).

¹ source : FTM

CARTE HYDROGRAPHIQUE

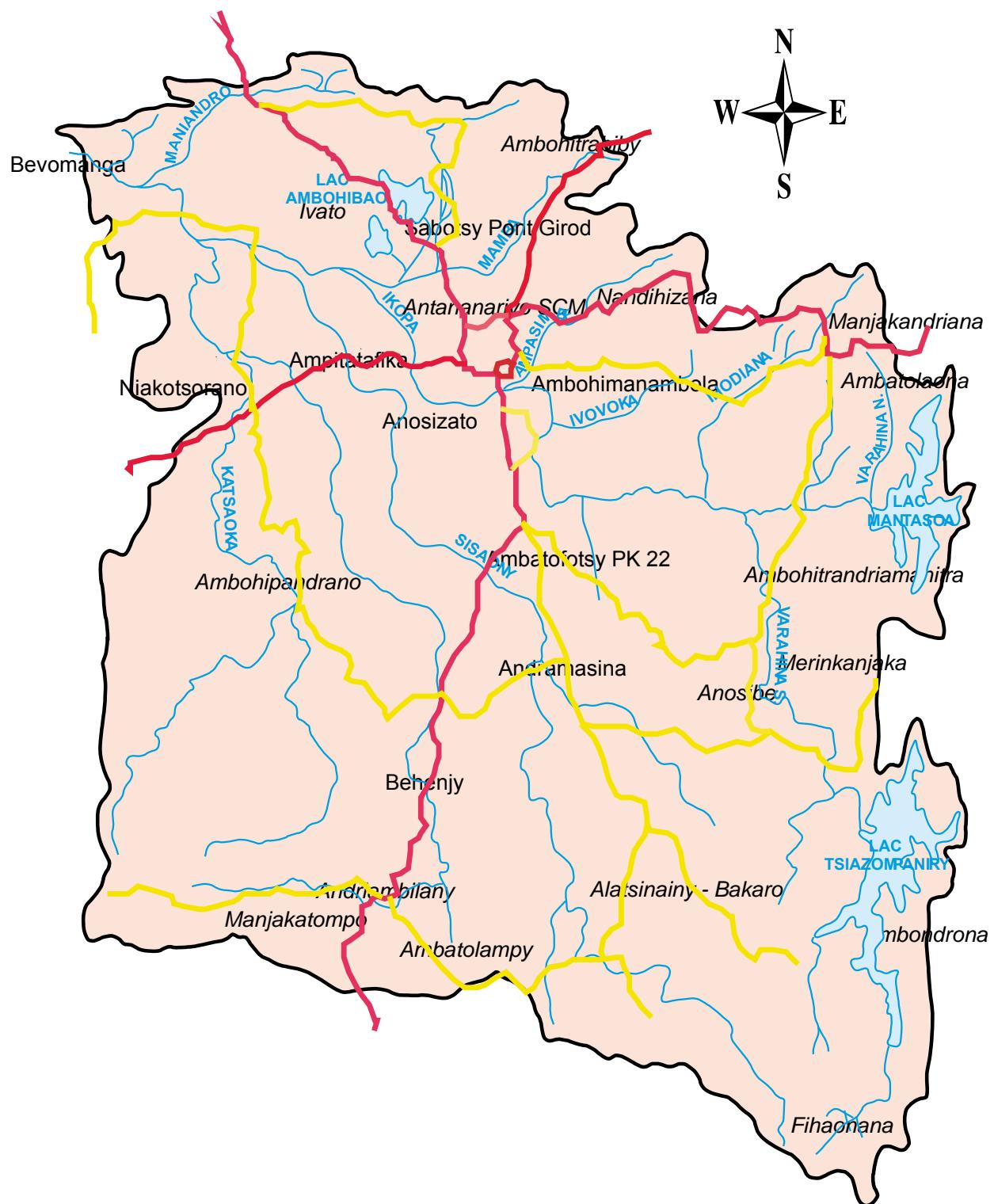


Figure n°6: Carte des réseaux hydrographiques du B.Vde l'lkopa

ECHELLE : 1 : 400 000

Chapitre II. FACTEURS CLIMATOLOGIQUES

1. GENERALITE SUR LE CLIMAT

Comme nous le savons, l'île de Madagascar est soumise à l'influence de deux grands centres d'action météorologique. L'un est la cellule océanique de hautes pressions non continue, soumise à l'influence du courant de perturbation polaire, et l'autre les basses pressions intertropicales au Nord, d'où le nom des vents : l'alizé et la mousson¹.

Quant à la zone considérée par la présente étude, elle se trouve entre le massif de Tsarantanana et celui de l'Ankaratra, les vents prennent une orientation de secteur Sud-Est, ce qui impose une courbure cyclonique aux lignes de courant, donc un accroissement de la convergence au sein de la masse d'aire et une recrudescence de précipitation.

Par conséquent, deux saisons se présentent alors dans cette zone :

- La saison fraîche : c'est une saison de la sécheresse dans les régions occidentales et des pluies de strato-cumulus dans les régions orientales.
- La saison chaude : c'est la saison de l'instabilité orageuse en toutes régions et, parfois des perturbations très importantes et très violentes se présentant sous forme de tempêtes dépressionnaires.

Entre autres, parmi ces facteurs climatologiques, les précipitations et l'évapotranspiration ont une influence beaucoup plus importante dans les études hydrologiques des bassins. Tandis que, les autres facteurs comme les vents, les températures, l'humidité relative ont une influence indirecte.

Remarque :

Il n'y a que deux sites (Ivato aéroport et tana SCM) qui permettent de suivre l'évolution climatique de la zone considérée. Les stations pluviométriques qui sont plus ou moins reparties dans le bassin présentent des lacunes importantes.

¹ Bibliographie 9

2. EQUIPEMENTS DU B.V DU POINT DE VUE METEOROLOGIQUE

Les caractéristiques les plus importantes des instruments météorologiques utilisés dans les réseaux de stations sont : la régularité, la précision, la simplicité, la commodité d'utilisation et d'entretien, la solidité de construction.

La Météorologie Nationale à Ampandrianomby utilise toujours deux types d'appareils de mesure :

- Les instruments à lecture directe
- Les appareils enregistreurs

Les instruments à lecture directe sont utilisés comme appareil de référence et nécessitent l'intervention d'un opérateur ou observateur.

Et les enregistreurs sont destinés à enregistrer une grandeur d'une manière continue. En d'autre terme, ils permettent de suivre l'évolution du paramètre observé dans le temps.

D'une manière générale et en liaison directe avec l'hydrologie, les stations mentionnées plus haut, sont équipées par¹ :

- Pylône de girouette et anémomètre à distance
- Abri météo pour psychromètre et thermomètres maxi et mini
- Abri météo pour enregistreurs (thermographe – hygrographe)
- Pluviomètre association
- Pluviomètre enregistreur ou pluviographe
- Héliographe
- Evaporomètre PICHE
- Bac d'évaporation

Pour le cas présent, le réseau d'observations pluviométriques du B.V est composé par des stations à équipement pluviométriques et des stations synoptiques, dont la répartition est affichée à la figure n°7².

¹ Bibliographie 18

² Bibliographie 17

CARTE DE STATION CLIMATIQUE



Figure n°7: Carte des stations climatiques du B.V supérieur de l'lkopa

3. VENTS

3.1 Types des vents

3.1.1- Vents d'alizé

Ce sont des vents de secteur Est à Est et Sud-Est qui soufflent toute l'année dans la partie Est de Madagascar. Ils proviennent de masse d'air polaire méridionale ayant parcouru un long trajet sur mer. Cet air présente une humidité relative importante, une température élevée et une instabilité très grande en arrivant sur le relief malgache et précisément dans le bassin versant supérieur de l'Ikopa, ce qui provoque des formations nuageuses épaisse et des pluies assez abondantes¹.

3.1.2- Vents de mousson

Ces vents viennent de l'hémisphère Nord et ne sont autre que les vents de cette région déviés par le relief africain et attaquent la partie côte Nord-Ouest de notre île. Ces vents n'ont pas en saison chaude, la constance de l'alizé en saison froide. Lors de sa pénétration dans le relief malgache (du Nord-Ouest vers le sud : haut plateau), on constate une alternance des influences de l'alizé et de la mousson².

Remarque :

On observe par intermittence des vents d'Ouest sur la partie méridionale de l'île. Ces vents sont peu persistant ; mais provoquent sur les régions méridionales de Madagascar un appui d'air plus frais que celui apporté par l'alizé.

3.2 Caractères

3.2.1- Direction des vents

C'est en saison fraîche, après la présence de la cellule de haute pression de l'océan indien, que la direction générale des vents est la mieux établie. Les vents

¹ Bibliographie 9

² Bibliographie 9

d'alizés se dirigent de l'Est en tournant en sens contraire des aiguilles d'une montre autour de l'anticyclone. La présence des reliefs de la haute terre modifie sa direction, mais en altitude les vents sont peu perturbés vers le relief et conservent leur direction initiale. Dans le bassin versant supérieur de l'Ikopa, les vents dominants semblent les plus souvent s'écouler en direction de l'Est et de Sud-Est. Pendant la saison sèche, l'alizé atteint jusqu'à 80%, tandis que la mousson est de 10% des vents circulant dans le bassin¹.

En saison chaude, les vents du secteur Est sont en général moins réguliers et moins actifs qu'en saison fraîche. Mais lorsque les vents entrent dans la zone considérée, les vents du secteur Est, Sud-Est sont les plus dominant.. Autrement dit, 65% des vents sont dominés par les alizés, contre 21% la mousson en saison des pluies.

3.2.2- Vitesse des vents

La vitesse du vent au voisinage du sol est plus grande le jour que la nuit. Cette vitesse augmente au cours de la matinée, atteint son maximum dans l'après-midi et décroît ensuite pendant la nuit. Et, les vents du secteur Est sont renforcés au cours de la journée par les appels d'air des centres thermodynamique de l'Ouest et leur vitesse augmente jusqu'à la disparition au cours de la nuit de ces centres de basse pression.

3.2.3- Régime des vents

Suivant la disponibilité des informations, il n'y a que celles des deux stations suivantes qu'on pourrait avoir des données plus récentes : Tana SCM, Ivato aéroport. Celle de la station de Mantasoa est beaucoup plus ancienne. D'ailleurs, dans cette dernière station, les vents d'Est dominent en toute saison en plus de 50% des cas. Toutefois, un très léger renforcement des vents d'Ouest est observé en saison de pluies.

Et, pour la station de Tana SCM, en toutes saisons, les vents du secteur Sud-Est sont le plus dominant et quelque fois celui de l'Est, et il y a un renforcement des vents d'ouest et Nord-Ouest en saison chaude².

¹ Bibliographie 9

² source : Service de la Météorologie

Pour la station d'Ivato, en toutes saisons, les vents dominants sont du secteur est à Sud-Est, Il y a un renforcement des vents d'Ouest et Nord-Ouest en saison de pluies. Ainsi, comme partout ailleurs, on a des rafales d'orages en saison chaude.

Pour plus amples informations, les valeurs de la vitesse, la direction du vent, et quelques diagrammes représentant les variations du vent se trouvent dans l'annexe n°2¹. En raison de l'insuffisance des données sur quelques stations, la carte des directions des vents qu'on trouve dans la page suivante est tirée de la « Fleuve et rivière de Madagascar ».

4. TEMPERATURES

Les températures sont soumises à des influences très diverses et, contrairement à ce qu'on pourrait penser à première vue, ce n'est pas la latitude, mais l'altitude qui constitue le facteur prépondérant². En effet, l'altitude moyenne du bassin varie de 1200 m dans les plaines, et atteint jusqu'à 2500 m dans les environ de la région de l'Ankaratra.

4.1 Mesure de température

A la station Météorologique d'Antananarivo, les appareils de mesure utilisés comportent un thermomètre à maxima, un thermomètre à minima et un thermographe. Ainsi, le thermomètre à maxima enregistre la température la plus élevée se produisant pendant une période déterminée (thermomètre à mercure). Tandis que le thermomètre à minima enregistre la température la plus basse qui s'est produit pendant une période déterminée (thermomètre à alcool). La fréquence de la lecture des paramètres de la température est de deux fois par jour. Enfin, le thermographe est un appareil qui fournit un enregistrement de la température de l'air sous abri. Les valeurs de la température sont enregistrées sur les diagrammes, en degrés et en dixième à chaque observation³.

¹ source : Météo

² Bibliographie 16

³ source : Service de la Météorologie

4.2 Valeurs caractéristiques des températures

Malgré l'insuffisance des stations d'observations dans la zone, la présente étude s'est contentée de caractériser le régime des températures en l'occurrence celle de Tana SCM et de l'Ivato aéroport.

Les valeurs caractéristiques du régime thermique de la zone d'étude sont illustrées dans les tableaux ci-dessus :

❖ Température moyenne en [°C]¹

Tana SCM (1961-1999)

| Moyenne annuelle | Amplitude annuelle | Moyenne du mois le plus frais | Moyenne du mois le plus chaud |
|------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 20,2 °C | 9,6 °C | 18,5 °C | 21,5 °C |

Tableau n°4 : Valeur des températures moyennes de Tana SCM

Ivato aéroport (1961-1999)

| Moyenne annuelle | Amplitude annuelle | Moyenne du mois le plus frais | Moyenne du mois le plus chaud |
|------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 20,4 °C | 10,2 °C | 18,4 °C | 21,8 °C |

Tableau n°5 : Valeur des températures moyennes de l'Ivato aéroport

❖ Température minimum et maximum absolue²

Tana SCM (1961-1999)

| Maximum absolu | | Minimum absolu | |
|----------------|----------|----------------|------|
| Température | Mois | Température | Mois |
| 32 °C | Novembre | 2,9 °C | Juin |

Tableau n°6 : Valeur des températures minimum et maximum absolue de Tana SCM

Ivato Aéroport (1961-1999)

¹ source : service de la Météorologie

² source : service de la Météorologie

| Maximum absolu | | Minimum absolu | |
|----------------|----------|----------------|------|
| Température | Mois | Température | Mois |
| 32,2 °C | Novembre | 1,2 °C | Août |

Tableau n°7 : Valeur des températures minimum et maximum absolue de l'Ivato aéroport

On constate que la température moyenne observée à la station Ivato Aéroport est légèrement supérieure à celle de TANA SCM. Par ailleurs, la température moyenne du mois le plus chaud relevée sur cette dernière est légèrement supérieure à celle de Tana SCM ; par contre, la température du mois le plus frais de la station d'Ivato est relativement inférieure à Tana.

On peut en conclure, d'après les valeurs caractéristiques de température portées aux tableaux mentionnés ci-dessus, une zone de stabilité thermique dans la région considérée.

Ce propos est confirmé par les valeurs recueillies sur les dix stations climatiques de la zone qui se trouvent dans l'annexe n°3. Ces valeurs sont consignées au tableau n°8 ci-dessous.

| Moyenne annuelle | Amplitude annuelle | Moyenne du mois le plus frais | Moyenne du mois le plus chaud |
|------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 17,4 °C | 11 °C | 13,6 °C | 20,2 °C |
| Maximum absolu | | Minimum absolu | |
| Température | Mois | Température | Mois |
| 36,2 °C | Octobre | -0,2 °C | Juin |

Tableau n°8 Températures moyennes et températures minimum et maximum absolue des dix stations de la zone¹

Par conséquent, les valeurs des températures obtenues dans le tableau n°4 (Tana SCM) peuvent être admises comme station de référence pour l'ensemble du bassin en raison de la différence relativement négligeable, et étant données que les informations sont aussi plus récentes, et toujours actualisées.

Ainsi, les courbes des moyennes mensuelles des températures maximales présentent un maximum unique en novembre, quelque fois en décembre,

¹ source : service de la Météorologie

correspondant au passage du soleil au Zénith. Les températures diminuent, ensuite à cause des pluies tombant en janvier, février et mars.

L'amplitude diurne des températures atteint son apogée en saison fraîche et devient minimale en saison des pluies.

Dans le bassin, les températures moyennes restent au tour de 20° (de l'ordre de 16° à 20°). Les températures maximums moyennes atteignent jusqu'à 23°, tandis que les températures minimums moyennes sont de l'ordre de 13°.

Dans la zone considérée, les températures sont modérées pendant la saison chaude, fraîches à froides suivant l'altitude durant l'hiver austral (dans la région près de l'Ankaratra la température atteint même jusqu'à 0°).

4.2.1- Variation de la température selon la latitude

La température augmente généralement du pôle à l'équateur, donc on peut avoir une diminution de la température de la latitude 18°41 à la latitude 19°31.

Pour cette variation, on utilise l'écart entre les températures moyennes mensuelles de la saison de pluie et celle de la saison sèche (Janvier et Juin). Ceci doit suivre régulièrement une courbe ascendante du 0° à 90° selon l'expérience faite¹. Ce propos est illustré par la figure n°8 mentionnée ci-dessous:

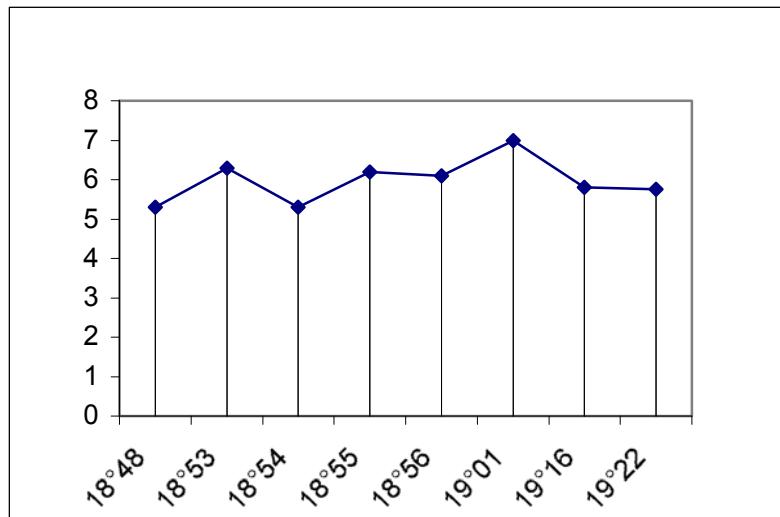


Figure n°8 : Ecart entre les températures moyennes mensuelles de juin et de janvier sous diverses latitudes

¹ Bibliographie 16

4.2.2- Variation de la température selon l'altitude

On constate habituellement que lorsque l'altitude augmente, la température semble diminuer. L'altitude joue un rôle très important dans la variation de la température.

Dans les régions où l'altitude est élevée (comme celle d'Ambatolampy, Manjakatompo, et Tsiazompaniry), la température se justifie à une valeur tournant de 16° à 17° en moyenne annuelle. Par contre, pour les stations à 1200 – 1350 mètres, elle varie de 18°C à 19°C Ainsi, la valeur de la température diminue légèrement quand l'altitude augmente. De même, pour les températures des deux stations dans les dernières années ; la valeur de celle d'Ivato qui se trouvait à une altitude 1200 m est légèrement supérieure à Tana.

La figure n°9 illustre la variation de la température avec l'altitude

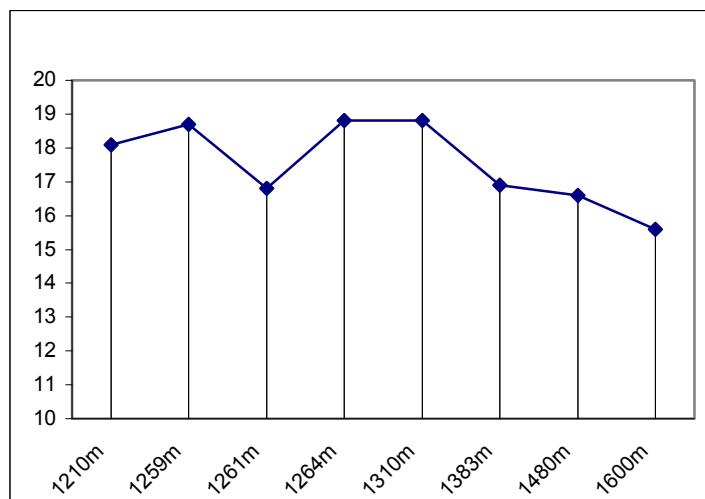


Figure n°9 : Variation de la température avec l'altitude

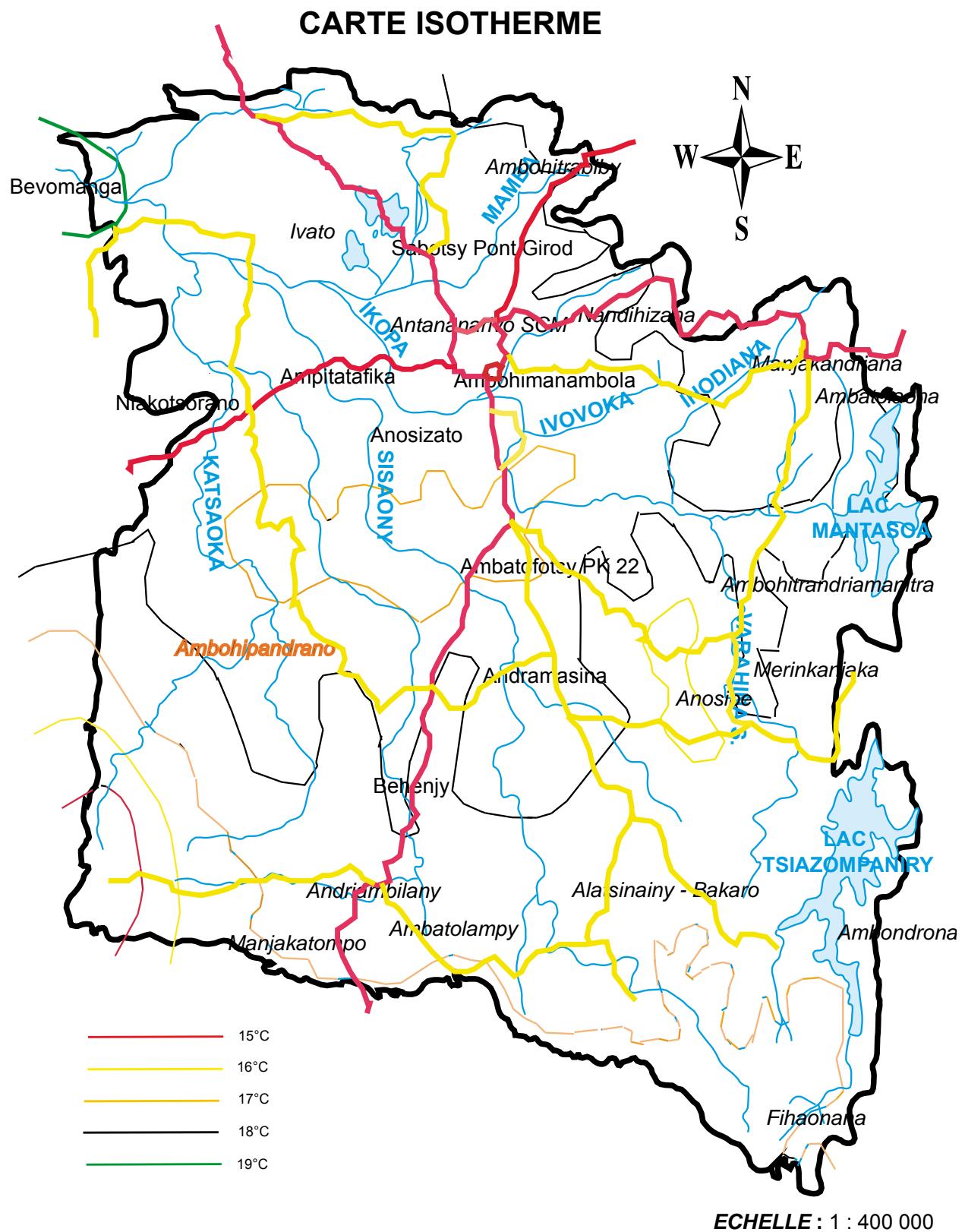


Figure n°10 : Carte isotherme du bassin versant supérieur de l'lkopa

5. HUMIDITE RELATIVE

5.1 Généralité et définition

Le déficit hygrométrique n'est autre que l'humidité relative de l'air qui est le rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température¹, et celui-ci a une influence à l'évaporation : un air saturé d'humidité empêche toute évaporation. D'après la loi de Dalton, si tous les autres facteurs sont invariables, le taux d'évaporation de la surface d'eau libre est proportionnel au déficit hygrométrique.

Donc, on définit l'humidité relative² : ϵ comme suit :

$$\epsilon = \frac{e}{e_w} \quad e \quad : \text{tension de vapeur actuelle}$$

e_w : tension de vapeur saturante à la température T_w

soit, en d'autre terme

$$\epsilon = \frac{f_a}{F_{te}} \quad \text{qui est rapporté à la température de l'eau : } t_e.$$

Ainsi, on appelle pouvoir évaporant, la proportionnalité entre le déficit hygrométrique, l'évaporation et l'écart psychrométrique $\theta = T_s - T_w$ [°C]

$$K. \theta = F_{te} - f_a$$

où

- F_{te} est la tension de vapeur saturante à la température de l'eau en surface, et est donné dans les tables. [en mmHg]
- f_a est la tension de vapeur existante effectivement dans l'air ambiant. [en mmHg]

Pour une ample information, on a démontre ce fait dans l'annexe n°4.

5.2 Instrument de mesure³

L'humidité relative est mesurée à l'aide d'un appareil appelé psychomètre, qui est équipé de 2 thermomètres placés côte à côté :

¹ Bibliographie 16

² Bibliographie 16

³ Bibliographie 18

- le premier est dit thermomètre sec, qui mesure une température t de l'air ambiant
- le second est dit thermomètre mouillé enveloppé d'une mousseline humectée constamment, indique une autre température t' à t

Les observations effectuées au psychromètre permettent de calculer la tension de vapeur actuelle, la température du point de rosée et l'humidité relative, à partir des températures du thermomètre sec et du thermomètre mouillé.

A part le psychromètre, il y en a aussi l'hygrographe à cheveux. Celui-ci est un instrument qui fournit un enregistrement de l'humidité relative de l'air.

5.3 Calcul de l'humidité relative

La manière habituelle de procéder à ce calcul consiste à déduire la tension de vapeur au moment de l'observation (d'après la formule psychrométrique)¹ :

$$e = e_w - A P (T_s - T_w)$$

e : tension de vapeur actuelle

e_w : tension de vapeur saturante à la température T_w du thermomètre mouillé

A : coefficient psychrométrique ($A = 0,00079$ pour les psychromètres simples et pour les températures au-dessus de 0°C)

P_a : pression de l'air au niveau de la station

T_s : température du thermomètre sec

T_w : température du thermomètre mouillé

Pour simplifier le calcul, on a le choix entre les deux méthodes suivantes :

1 – Les valeurs de l'humidité relative peuvent obtenir à partir des règles de calcul après les relevés des températures sèche et mouillée. Il existe deux types de règle de calcul :

- la règle à calculer « Météo Afrique occidentale »
- la règle à calculer « Météo National »

A Madagascar, on utilise la première règle et on peut le voir dans l'annexe n°4.

¹ Bibliographie 18

2 – Les valeurs du degré hygrométrique peuvent être aussi calculées par la loi de DALTON en faisant intervenir une table de mesure calculée à partir de :

$$Fte - fa = 0,00079 \times 750 \times (t' - t'')$$

Remarque : lorsque l'air ambiant est saturé de vapeur d'eau, $t' = t$.

Les valeurs caractéristiques de l'humidité relative à la station de Tana sont représentées par le tableau ci-après (%).

| Minimum | Mois Min | Maximum | Mois Max | Moyenne annuelle |
|---------|-----------|---------|----------|------------------|
| 63% | Septembre | 85% | Janvier | 76% |

Tableau n°9 : Valeurs caractéristiques de l'humidité relative¹

La valeur de l'humidité est maximale en janvier et, est minimale en septembre. Cela nous indique que la valeur de l'humidité est minimale en saison sèche et elle atteint son apogée en saison de pluie.

Par conséquent, dans tous les bassins, l'état hygrométrique est plus élevé en saison chaude qu'en saison fraîche.

La valeur de l'humidité relative relevée aux quelques stations comme : Tana SCM, Ivato aéroport, est portée à l'annexe n°4.

6. EVAPORATION, TRANSPiration, EVAPOTRANSPIRATION

6.1 Evaporation

6.1.1- Définition

Par définition, «les hydrologues désignent par évaporation l'ensemble des phénomènes qui transforment l'eau en vapeur par un processus spécifiquement physique ».

¹ source : service de la Météorologie

A défaut des instruments en ce qui concerne les stations d'observations météorologiques, sauf à Tana SCM. Les évaporations ne sont couramment utilisées que pour la détermination des quelques paramètres climatologiques comme l'évapotranspiration potentielle.

6.1.2- *Instrument de mesure*

On distingue d'abord deux types d'instrument de mesure tels que : l'évaporomètre et le bac d'évaporation¹.

L'évaporomètre permet de mesurer la perte en eau d'une surface poreuse saturée et le bac d'évaporation est utilisé souvent à mesurer le changement du niveau d'une surface d'eau libre, généralement pour le grand réservoir

- *Evaporomètre PICHE*

Cet appareil est le plus utilisé à Madagascar et est caractérisé par un tube gradué en cm³ que l'on remplit d'eau distillée.

L'évaporation PICHE annuelle varie d'une station à l'autre, sans qu'il soit possible de lier systématiquement ces variations à la situation géographique ou à des paramètres caractéristiques du climat. Pour chaque station, le résultat des observations est surtout fonction de l'exposition de l'instrument et de son entretien.

- *Evaporation sur bac*

Ce sont des bassins d'un diamètre de 1 à 5 m et d'une profondeur de quelques décimètres. Ils peuvent être soit posés sur une claire à quelque centimètre du sol ou enfouies en partie dans le sol. Ils peuvent aussi être partiellement immergés dans un lac.

6.2 Transpiration

6.2.1- *Définition*

Avant le processus d'évaporation par les plantes, ces dernières absorbent par leurs racines les eaux de la profondeur du sol dont elles ont besoin à leur développement et à leur vie. Ce phénomène est appelé «*transpiration*»².

¹ Bibliographie 18

² Bibliographie 16

6.2.2- *Instrument de mesure*

On peut distinguer trois types de mesure de transpiration¹ :

- mesure directe de la vapeur d'eau transpirée par les plantes
- mesure du poids des plantes et du sol qui l'alimente
- mesure de la quantité d'eau nécessaire à l'alimentation des plantes

La transpiration dépend donc de la couverture végétale du sol et aussi la capacité de rétention des constituants géologiques et pédologiques et aussi à la capacité correspondant au point de flétrissement de notre terrain.

6.3 Evapotranspiration

6.3.1- *Evapotranspiration potentielle*

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été d'une manière générale calculée en vue d'évaluer les besoins en eau d'irrigation. Elle est l'ensemble des deux processus cités supra : évaporation physique et évaporation biologique. Elle s'explique alors par l'évaporation de l'eau dans le sol ; la transpiration de sa couverture végétale qui exigent de l'énergie fournie par la radiation solaire et par l'émission de chaleur du sol². Par conséquent, elle est définie comme l'évapotranspiration d'une surface (plante et sol) qui serait suffisamment approvisionné en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par la condition climatique.

Ainsi, plusieurs méthodes d'estimation ont été préconisées en considérant diverses observations météorologiques aboutissant aux données climatiques correspondantes.

a- Méthode de THORNTHWAITE (Th)

Cette méthode de Thornthwaite est assez ancienne et est basée sur de nombreuses expériences effectuées. Elle dépend seulement de la température.

¹ source : service de la Météorologie

² Bibliographie 16

b- Méthode de BLANEY-CRIDDLE (B.C)

Cette méthode est obtenue à partir des essais effectués en zone aride et subaride. Elle ne fait intervenir que la température.

c- Méthode de PENMAN**- PENMAN (P) et PENMAN MODIFIEE**

Cette méthode est représentée par une formule complexe. La formule originelle de Penman (1948) préconisait la perte d'eau par évaporation à partir d'une surface d'eau libre et est formée de deux termes d'énergie :

- Energie radiative (R_n) qui comprend l'ensemble des rayonnements reçus ou émis au niveau de la surface évaporante.
- Energie advective (ea) qui traduit l'effet de l'air ambiant sur la demande en eau.

La formule de Penman et de Penman modifiée est universelle. Elle a une réputation scientifique et offrait les meilleurs résultats avec de faibles erreurs en zones arides, malgré une tendance à surestimer les valeurs obtenues de l'ETP.

- PENMAN-MONTEITH (P-M)

Cette méthode est toujours dérivée de la formule de Penman et Penman modifiée. Elle est basée sur des paramètres qui mettent en jeu l'échange d'énergie et le flux de chaleur latente provenant de l'uniforme expansion de végétation. Elle est utilisée surtout dans l'agrométéorologie. Toutefois, la plupart des agrométéorologues acceptent que cette formule de Penman donne une estimation réaliste pour les différents paramètres climatiques. Elle a été publiée par la F.A.O¹.

d- Méthode de TURC (Tu)

Cette méthode fait intervenir la radiation, elle donne un bon résultat dans les régions humides où le terme aérodynamique est relativement petit, et vise une estimation assez bonne en régions tropicales et équatoriales ; alors qu'en régions arides, elle tend à sous-estimer les valeurs obtenues.

¹ Bibliographie 12

Les détails de calcul correspondant à ces différentes formules d'évaluation de l'ETP sont mentionnés aux tableaux de l'annexe n°5.

Quant aux résultats de calcul, les tableaux n°10 et n°11 permettent de comparer les valeurs à partir des méthodes présentées plus haut.

ETP en [mm] dans le B.V d'après les différentes méthodes ci-dessus :

TANA SCM 1961 -1998

| | Jan | Févr. | Mars | Avr. | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. | Nov. | Déc. | Tot. A |
|------|-----|-------|------|------|-----|------|--------|------|------|------|------|------|--------|
| Th | 90 | 80 | 82 | 72 | 65 | 55 | 55 | 58 | 64 | 78 | 84 | 90 | 873 |
| B.C | 165 | 145 | 153 | 140 | 136 | 125 | 130 | 135 | 138 | 153 | 156 | 165 | 1741 |
| Turc | 126 | 113 | 117 | 108 | 96 | 84 | 88 | 102 | 119 | 134 | 129 | 120 | 1336 |
| Penm | 137 | 120 | 126 | 108 | 91 | 83 | 86 | 104 | 128 | 152 | 153 | 138 | 1426 |
| P-M | 98 | 98 | 101 | 91 | 79 | 72 | 75 | 89 | 106 | 125 | 125 | 112 | 1168 |

Tableau n°10 : Valeurs de l'ETP moyenne de la station de Tana SCM par les différentes méthodes

IVATO AEROPORT 1961 -1998

| | Jan | Févr. | Mars | Avr. | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. | Nov. | Déc. | Tot. A |
|-----|-----|-------|------|------|-----|------|--------|------|------|------|------|------|--------|
| Th | 91 | 81 | 83 | 73 | 64 | 54 | 54 | 58 | 64 | 78 | 89 | 92 | 881 |
| B.C | 165 | 146 | 154 | 141 | 136 | 125 | 129 | 135 | 139 | 153 | 159 | 166 | 1748 |
| Tu | 126 | 114 | 117 | 108 | 96 | 84 | 88 | 102 | 119 | 135 | 131 | 121 | 1341 |
| P | 150 | 130 | 133 | 114 | 95 | 83 | 88 | 109 | 137 | 164 | 153 | 155 | 1511 |
| P-M | 121 | 102 | 119 | 106 | 93 | 85 | 85 | 98 | 110 | 137 | 133 | 116 | 1304 |

Tableau n°11 : Valeurs de l'ETP moyenne de la station de l'Ivato aéroport par les différentes méthodes

On peut dire que les valeurs de l'ETP sont élevées en période de pluie, mais elles diminuent en saison sèche. Par suite, ses évolutions changent suivant la saison. Ainsi, la valeur de la moyenne annuelle de l'ETP se différencie en fonction de la méthode utilisée pour le calcul. En effet, l'ETP selon Blaney-Criddle présente des valeurs plus grandes pendant tous les mois tandis que celles trouvées par la formule de Thornthwaite sont les plus faibles.

En comparant les résultats des deux stations, on repère que la moyenne mensuelle et annuelle sur l'Ivato aéroport, s'accroît de peu par rapport à la station de Tana SCM. Cela peut être aussi expliqué par la variation de la température de la station. Les courbes de variation de l'ETP sur les stations Tana SCM et Ivato Aéroport s'illustrent respectivement dans la figure n°11 et n°12 de la page suivante.

6.3.2- Déficit d'écoulement

a- Définition

Le déficit d'écoulement moyen annuel est, par définition, la différence entre la hauteur moyenne annuelle des précipitations tombées sur le B.V et la hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau. Cette dernière est uniformément répartie sur le même bassin, et représenterait le volume total débité par le cours d'eau à l'exutoire.

Il intègre dans l'ensemble du bassin considéré les évaporations physiques et physiologiques.

b- Formule donnant le déficit d'écoulement en fonction des précipitations et de la température

b.1- Formule de déficit d'écoulement selon TURC :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L_t^2}}}$$

avec L_t : $0,05T^3 + 25T + 300$

T° : Température moyenne annuelle en $^{\circ}\text{C}$

P : Pluie moyenne annuelle en [mm]

b.2- Formule de déficit d'écoulement selon COUTAGNE

$$D = P - \lambda P^2$$

avec $\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T^\circ}$

T° : Température moyenne annuelle en $^{\circ}\text{C}$

$$\frac{1}{8\lambda} \left(P - \frac{1}{2\lambda} \right)$$

Si $P < \frac{1}{8\lambda}$ $D = P$ et pas d'écoulement

Si $P > \frac{1}{2\lambda}$ $D = 0,2 + 0,035T^\circ$

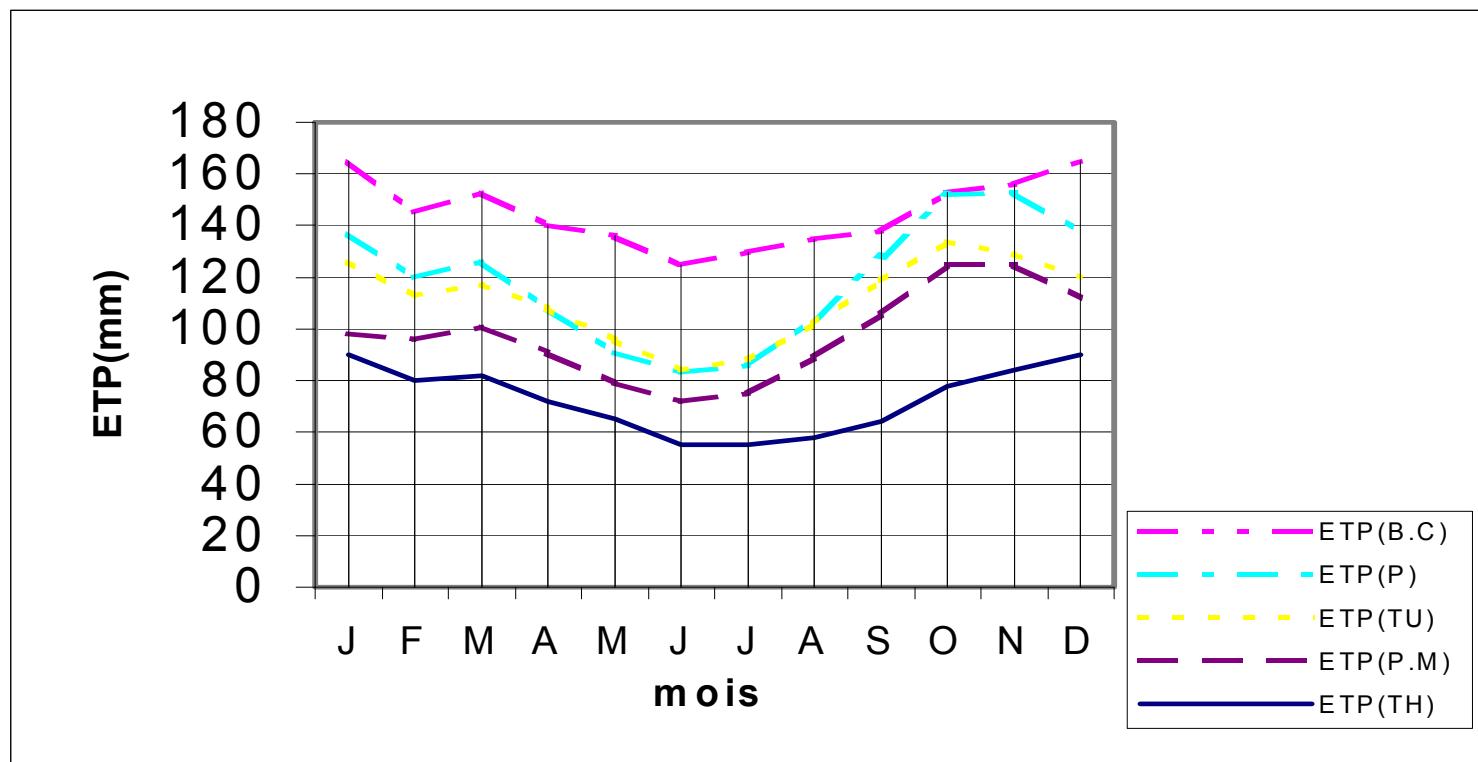


Figure n°11 : Courbe de variation mensuelle de l'ETP de Tana SCM

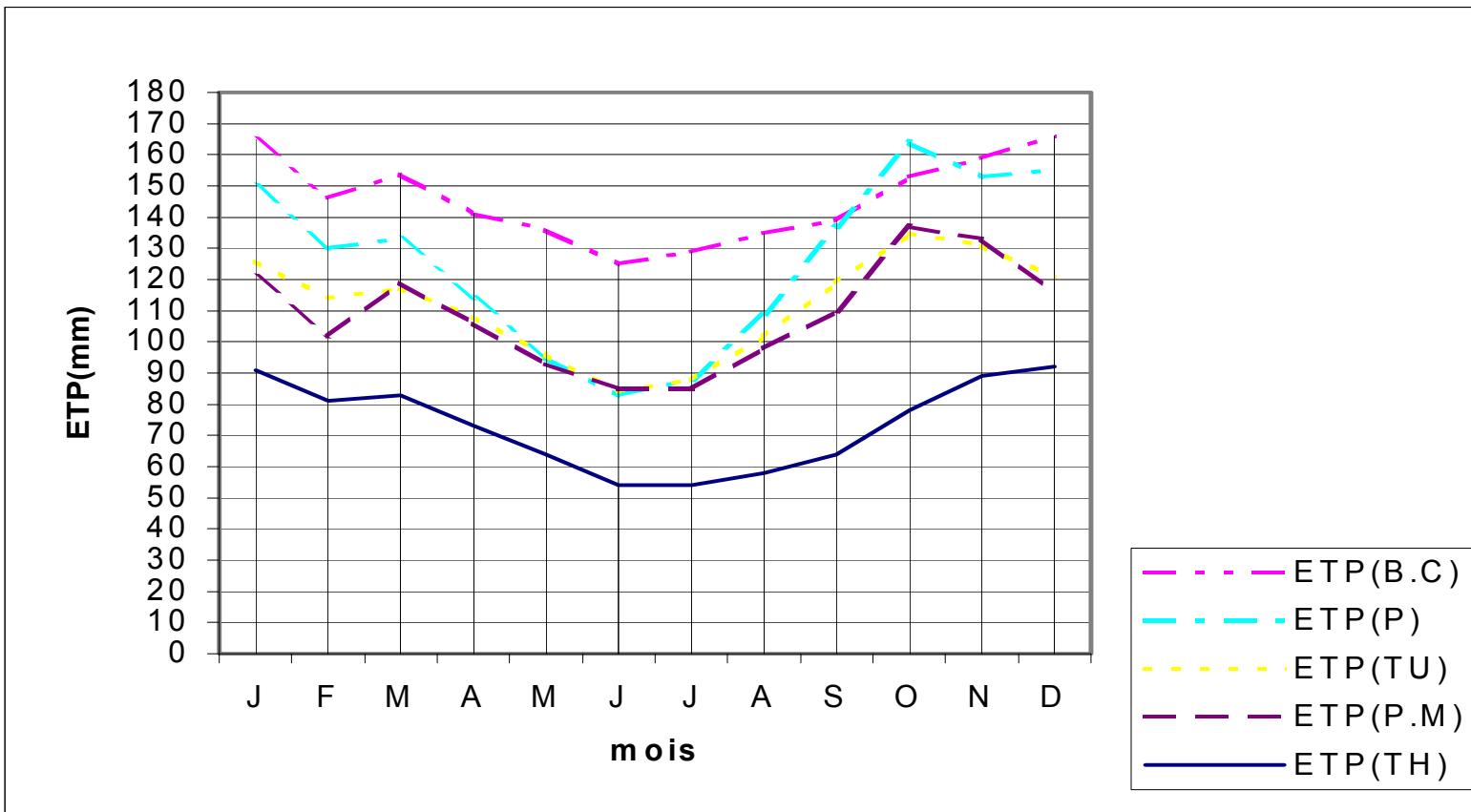


Figure n°12 : Courbe de variation mensuelle de l'ETP de l'Ivato aéroport

7. PRECIPITATIONS

Les apports pluviométriques constituent l'un des éléments essentiels dans la formation des écoulements. Dans cette partie, on essayera de donner un aperçu global des caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude. A la suite des différents traitements des données, les apports pluviométriques du bassin seront représentés sous forme de valeurs statistiques.

7.1 Analyse pluviométriques mensuelles

L'analyse statistique des données pluviométriques mensuelles, suivant les différentes lois d'ajustement dont les détails sont portées en annexe n°5, permet de quantifier ce régime pluviométrique du bassin. Ainsi, pour les stations de référence considérées. Les caractéristiques pluviométriques en mm relatifs à chaque station sont :

| | Janv. | Fév. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. | Nov. | Déc. |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| P₁₀₀ | 738,6 | 497,2 | 389,4 | 116,9 | 60,1 | 19,3 | 34,5 | 28,1 | 48,0 | 178,7 | 373,0 | 439,4 |
| P₅₀ | 687,1 | 470,7 | 363,8 | 108,9 | 54,8 | 17,7 | 31,5 | 25,8 | 43,6 | 163,8 | 344,6 | 414,9 |
| P₁₀ | 545,6 | 397,7 | 293,6 | 86,9 | 40,1 | 13,1 | 23,3 | 19,6 | 31,4 | 122,6 | 266,5 | 347,7 |
| P₅ | 466,6 | 356,9 | 254,3 | 74,7 | 31,9 | 10,5 | 18,8 | 16,1 | 24,6 | 99,6 | 222,9 | 310,1 |
| P₂ | 310,4 | 276,3 | 176,8 | 50,4 | 15,7 | 5,5 | 9,7 | 9,2 | 11,1 | 54,1 | 136,7 | 235,9 |

Tableau n°12 : Caractéristiques pluviométriques mensuels de Tana SCM

| | Janv. | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. | Nov. | Déc. |
|------------------------|--------------|------------|-------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| P₁₀₀ | 828,0 | 581,5 | 513,4 | 141,6 | 105,7 | 14,9 | 40,5 | 20,8 | 80,7 | 318,0 | 337,8 | 657,7 |
| P₅₀ | 769,7 | 549,0 | 476,8 | 132,7 | 95,5 | 13,6 | 36,7 | 19,2 | 72,8 | 290,9 | 314,4 | 611,9 |
| P₁₀ | 609,2 | 459,7 | 376,1 | 108,2 | 67,5 | 10,0 | 26,4 | 14,6 | 51,0 | 216,4 | 250,2 | 485,8 |
| P₅ | 519,6 | 409,8 | 319,9 | 94,5 | 51,8 | 8,0 | 20,7 | 12,1 | 38,9 | 174,8 | 214,3 | 415,4 |
| P₂ | 342,5 | 311,2 | 208,8 | 67,5 | 20,9 | 4,1 | 9,3 | 7,1 | 14,9 | 92,5 | 143,4 | 276,3 |

Tableau n°13 : Caractéristiques pluviométriques mensuels de l'Ivato aéroport

Où P_{100} correspond aux pluies de retour 100 ans.

P_{50} correspond aux pluies de retour 50 ans.

P_{10} correspond aux pluies de retour 10 ans.

P_5 correspond aux pluies de retour 5 ans.

P_2 correspond aux pluies de retour 2 ans.

Pendant le mois de novembre jusqu'en mars, les valeurs de la pluie moyenne peuvent aboutir au minimum à 130 mm. De même, les pluies maxima et minima, ainsi que les pluies maximales de 24 heures sont beaucoup plus élevées durant ces mois. En conséquence, ce période est manifesté par la plus forte pluie de l'année et qui atteint souvent son apogée en mois de janvier. Explicitement, les pluies tombées pendant cette période représentent environ les 85% (voir les tableaux suivants) des pluies totales pendant l'année. En revanche, la pluie moyenne diminue jusqu'à une valeur minimale pendant le reste du mois et se produit surtout en juin.

CARACTERISTIQUES STATIQUES DES PRECIPITATIONS A LA STATION DE REFERENCE

TANA SCM

| 1978-1998 | Janv. | Fev | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct | Nov | Dec | Année |
|-------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|--------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Moyenne [mm] | 310,4 | 276,3 | 176,8 | 50,4 | 15,7 | 5,5 | 9,7 | 9,2 | 11,1 | 54,14 | 136,7 | 235,9 | 1231,8 |
| Ecart-type | 183,76 | 94,82 | 91,24 | 28,55 | 19,05 | 5,94 | 10,65 | 8,1 | 15,83 | 53,49 | 101,4 | 87,32 | 257,0 |
| Coeff de var° | 0,59 | 0,34 | 0,52 | 0,57 | 1,21 | 1,09 | 1,1 | 0,88 | 1,42 | 0,99 | 0,74 | 0,37 | 0,2 |
| Maxima | 738,8 | 454,6 | 358,6 | 109,4 | 67,4 | 21,8 | 41,8 | 30,8 | 62,8 | 197,3 | 407,2 | 363,9 | 1790,8 |
| Minima | 85,3 | 142 | 32,5 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 9,7 | 81,9 | 776,6 |
| Intervalle de Variation | 653,5 | 312,6 | 326,1 | 108,8 | 67 | 21,5 | 41,5 | 30,8 | 62,8 | 197,3 | 397,5 | 282 | 1014,2 |
| Nbr moye de Jour | 34 | 33 | 28 | 16 | 9 | 10 | 12 | 12 | 6 | 14 | 19 | 33 | 129 |
| Pluie max. de 24 heures | 147 | 98,7 | 84,7 | 56,5 | 42,5 | 19 | 29,9 | 26,7 | 29,7 | 69,8 | 115,2 | 81,8 | |

Tableau n°14 : Caractéristiques statiques des précipitations à Tana SCM

CARACTERISTIQUES STATIQUES DES PRECIPITATIONS A LA STATION DE REFERENCE

IVATO AEROPORT

| 1979-1998 | Jan | Fév. | Mar | Avr | Mai | Juin | JUIL | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Année |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Moyenne [mm] | 342,5 | 311,2 | 208,8 | 67,5 | 20,9 | 4,2 | 9,3 | 7,1 | 14,9 | 92,5 | 143,4 | 276,3 | 1498,5 |
| Ecart-type | 208,4 | 116,0 | 130,7 | 31,8 | 36,4 | 4,6 | 10,4 | 5,9 | 28,2 | 96,77 | 83,42 | 163,7 | 320,9 |
| Coeff de var° | 0,61 | 0,37 | 0,63 | 0,47 | 1,74 | 1,13 | 1,12 | 0,83 | 1,89 | 1,05 | 0,58 | 0,59 | 0,21 |
| Maxima | 795,7 | 534 | 533,1 | 142,2 | 158,9 | 18,5 | 38,1 | 17,4 | 101,3 | 354,1 | 308,2 | 720,4 | 2060,4 |
| Minima | 81,2 | 126,7 | 34,6 | 22,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0,3 | 0 | 0,5 | 15,4 | 54,7 | 920,5 |
| Intervalle de Variation | 714,5 | 407,3 | 498,5 | 120,1 | 158,8 | 18,4 | 38,1 | 17,1 | 101,3 | 353,6 | 292,8 | 665,7 | 1139,9 |
| Nbr moy de Jour | 20 | 18 | 16 | 9 | 5 | 5 | 6 | 5 | 3 | 9 | 11 | 17 | 123 |

Tableau n°15 : Caractéristiques statiques des précipitations à Ivato aéroport

7.2 Caractéristiques pluviométriques annuels

7.2.1- Répartition de pluie moyenne annuelle

La pluie moyenne annuelle peut être répartie comme suit :

| Nombre de jours % | | | Pluviométrie totale (mm) | Nombre moyen de jour de pluies | Mois secs |
|---|---|---|--------------------------|--------------------------------|-----------|
| De faible précipitation $0 < P < 5 \text{ mm}$ | De moyenne précipitation $5 < P < 20 \text{ mm}$ | De forte précipitation $P > 20 \text{ mm}$ | | | |
| 28,7% | 65,1% | 6,2% | 1291,8 | 129 | Mai-Sept |

Tableau n°16 : Caractéristiques pluviométriques annuels de Tana SCM:

| Nombre de jours % | | | Pluviométrie totale (mm) | Nombre moyen de jour de pluies | Mois secs |
|---|---|---|--------------------------|--------------------------------|-----------|
| De faible précipitation $0 < P < 5 \text{ mm}$ | De moyenne précipitation $5 < P < 20 \text{ mm}$ | De forte précipitation $P > 20 \text{ mm}$ | | | |
| 23% | 65% | 12% | 1427,2 | 123 | Mai-Sept |

Tableau n°17 : Caractéristiques pluviométriques annuels de l'Ivato aéroport

Durant la période d'observation 1978-1999, les variations extrêmes annuelles sont caractérisées par un maximum 1593 mm en 1994 et un minimum de 776,6 mm en 1990 pour la station Tan SCM. Quant aux nombres de jours de pluies, il y pleut 129 jours en moyenne avec un maximum de 165 j, et un minimum de 109 j.

Tandis que la variation extrême annuelle de la station Ivato a un maximum 2060,4 mm en 1982 et un minimum de 920,5 mm en 1999. Il y pleut 123 jours en moyenne avec un maximum de 150 j, et un minimum de 103 j.

7.2.2- Etude statistique des pluies moyennes annuelles

L'analyse statistique sur les pluies moyennes annuelles s'effectue pour la période de janvier en décembre. Pour cela, on dispose de vingt et un années d'observations obtenues de 1978 à 1998 pour les deux stations du B.V.

Selon les valeurs des paramètres d'adéquation aux lois théoriques d'ajustement, les distributions des lois : NORMALE, LOG NORMALE, GAMMA INCOMPLETE, et la loi de GUMBEL semblent les mieux adaptées à l'échantillon considérée. Ces lois doivent être accompagnées des tests de KHI-DEUX, et ce dernier déterminera leur rejet ou leur adoption au seuil de signification correspondante.

Les principales caractéristiques d'une série⁴⁰ :

- la moyenne arithmétique : $\bar{P} = \frac{\sum P_i}{N}$

P_i : précipitation de chaque année i

N : nombre de l'échantillon

- le coefficient de variation : $Cv = \frac{\sigma}{\bar{P}}$

avec $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{N-1}}$ pour $N < 30$ donc $Cv = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{N-1}}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{N}} \text{ pour } N \geq 30 \text{ donc } Cv = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{N}}$$

σ : écart-type

et $K_i = \frac{P_i}{\bar{P}}$

A la suite des procédures de calcul, dont les détails sont déterminés en annexe n°6, on retrouve les caractéristiques suivantes :

| Stations | \bar{P} [mm] | N | σ | C_v |
|----------------|----------------|----|----------|-------|
| TANA SCM | 1921,8 | 21 | 256,99 | 0,20 |
| IVATO AEROPORT | 1498,5 | 20 | 320,91 | 0,21 |

Tableau n°18 : Principal caractéristique pluviométrique d'une série dans les stations de référence

⁴⁰ Bibliographie 2

a- Pluie moyenne annuelle :

Aux résultats des calculs effectués en annexe n°6, les tableaux suivants donnent les valeurs fréquentielles des pluies annuelles à chaque loi et à chaque station.

TANA SCM (a) et IVATO AEROPORT (b)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | | |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | Période de retour [ans] | | | | | | | | | |
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 | |
| P(mm) | (a) | 1890,6 | 1818,7 | 1620,8 | 1510,3 | 1291,8 | 1073,4 | 962,8 | 765,0 | 693,0 |
| | (b) | 2246,2 | 2156,3 | 1909,3 | 1771,3 | 1498,5 | 1225,7 | 1087,7 | 840,7 | 750,8 |

Tableau n°19 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Gauss

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | | |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | Période de retour [ans] | | | | | | | | | |
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 | |
| P(mm) | (a) | 1967,7 | 1856,4 | 1581,7 | 1446,4 | 1212,0 | 1015,6 | 928,7 | 791,2 | 746,5 |
| | (b) | 2488,9 | 2338,2 | 1969,3 | 1789,2 | 1480,3 | 1224,7 | 1112,7 | 937,2 | 880,4 |

Tableau n°20 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Galton

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | | |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | Période de retour [ans] | | | | | | | | | |
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 | |
| P(mm) | (a) | 1929,5 | 1796,6 | 1493,6 | 1341,2 | 1126,8 | 965,5 | 849,1 | 798,6 | 766,5 |
| | (b) | 2253,7 | 2095,0 | 1721,1 | 1551,2 | 1295,1 | 1102,5 | 1023,2 | 903,0 | 864,5 |

Tableau n°21 : Résultats statistiques des pluies moyennes de période de retour différente selon Gumbel

b- Pluie maximum en 24 heures

Les tableaux suivants donnent les valeurs fréquentielles de pluie maximum en 24 heures à chaque loi et à chaque station.

| Année Hydrologique p% | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 2 | 5 | 10 | 50 |
| P(mm) (a) | 151,8 | 144,3 | 123,8 | 112,3 | 89,6 | 66,9 | 55,5 | 34,9 | 27,4 |

Tableau n°22 : Résultats statistiques des pluies maximum de 24 heures de période de retour différente selon Gauss

| Année Hydrologique p% | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 2 | 5 | 10 | 50 |
| P(mm) (a) | 171,4 | 157,7 | 125,6 | 110,0 | 86,0 | 66,8 | 58,9 | 46,9 | 43,1 |

Tableau n°23 : Résultats statistiques des pluies maximum de 24 heures de période de retour différente selon Galton

| Année Hydrologique p% | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 2 | 5 | 10 | 50 |
| P(mm) (a) | 145,3 | 133,5 | 105,7 | 93,1 | 74,1 | 59,8 | 53,9 | 45,0 | 42,1 |

Tableau n°24 : Résultats statistiques des pluies maxima de 24 heures de période de retour différente selon Gumbel

8. INFLUENCE SUR L'ÉCOULEMENT

L'intensité, le volume, la fréquence des pluies et leur répartition au cours de l'année conditionnent notamment l'importance de la caractéristique de ruissellement. Le volume d'eau en excès à la surface dépend de l'intensité de la pluie et du volume total précipité. Il existe un seuil d'intensité au-dessous duquel le ruissellement ne se forme pas. L'indice classique de WICHMEIER, défini en 1959 pour quantifier l'érosion des sols aux U.S.A., place cette limite pour une intensité moyenne de 25 mm/h pendant au moins 30 minutes. Cette valeur a été remise en question par les auteurs européens qui ont montré que le ruissellement peut apparaître pour des valeurs seuils bien plus faibles (2 à 10 mm/h)⁴¹. Les précipitations peuvent se faire sous forme d'averses violentes qui entraîne un ruissellement important.

⁴¹ Bibliographie 19

A la suite des études effectuées précédemment, des résultats ont été obtenus pour chaque station de référence ainsi que pour le bassin versant proprement dit. Les tableaux n°25, 26 récapitulent les résultats du bilan annuel.

| | |
|---|--------------------------------|
| Température moyenne ETP (Penman-Monteith) | 20,2°C 1168mm 1291,8mm |
| Pluie ETR Réserve eau utile selon les mois | 907,5mm varie de 100 à 0 mm |
| | |

Tableau n°25 : Bilan annuel calculé dans la station Tana SCM

| | |
|---|--|
| Température moyenne ETP (Penman-Monteith) | 20,4°C 1305mm |
| Pluie ETR Réserve eau utile selon les mois | 1498,5mm 972,7mm varie de 100 à 0 mm |
| | |

Tableau n°26 : Bilan annuel calculé dans la station Ivato

| | |
|---|--|
| Température moyenne ETP (Penman-Monteith) | 20,3°C 1237mm |
| Pluie ETR Réserve eau utile selon les mois | 1395,2mm 941,6mm varie de 100 à 0 mm |
| | |

Tableau n°27 : Bilan annuel calculé dans le bassin

A défaut des données sur plusieurs stations, la présente étude a été contrainte d'adopter comme moyenne du bassin. Aux résultats desquels, on aboutit aux valeurs présentées ci-dessus (tableau n°27).

En outre, le bilan hydrique du B.V supérieur de l'Ikopa sera consigné dans le tableau suivant

| MOIS | NOV | DEC | JAN | FEV | MAR | AVR | MAI | JUI | JUL | AOU | SEP | OCT | TOTAL |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| P | 140,1 | 256,1 | 326,4 | 293,7 | 192,8 | 58,9 | 18,3 | 4,8 | 9,5 | 8,2 | 13,0 | 73,3 | 1395,2 |
| ETP | 129 | 114 | 110 | 99 | 110 | 99 | 86 | 79 | 80 | 94 | 108 | 131 | 1237 |
| P-ETP | 11,1 | 142,1 | 216,9 | 194,7 | 82,8 | -39,6 | -67,7 | -73,7 | -70,5 | -85,3 | -95,0 | -57,7 | 158,2 |
| RFU | 11,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 60,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 471,5 |
| Transfert | 0,0 | 53,2 | 216,9 | 194,7 | 82,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 547,6 |

Source : bibliographie 10

Tableau n°28 : Bilan hydrique du bassin

L'ETP varie largement selon les régions et les périodes de l'année : dans le bassin de l'Ikopa, elle est légèrement inférieure pendant le mois d'hiver, et peut atteindre 100 mm en janvier

Les précipitations efficaces sont égales à la quantité d'eau apportée par les précipitations moins l'évapotranspiration réelle : c'est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et qui constitue la réserve utile ; une partie descend vers la nappe quand la capacité maximale de la réserve utile est dépassée.

Ainsi, l'étude du bilan hydrique a une grande importance pour l'agriculture. L'évaluation de la réserve utile du sol permet de décider s'il est nécessaire de pratiquer l'irrigation bien avant les signes de fanaison de la plante. Néanmoins, l'ETP est une valeur moyenne calculée pour une valeur moyenne de couverture végétale et de sol naturel. Ce qui ne correspond pas aux conditions particulières des terres de culture. Il faut tenir compte de l'espèce végétale cultivée et de son état de végétation. On module la valeur de l'ETP par un coefficient cultural k_c (peut être supérieur à 1 en période de pleine activité de la plante). La valeur de l'ETP sur terre cultivée est l'évapotranspiration maximale ou ETM.

PARTIE II

ANALYSE DES DONNEES HYDROLOGIQUES

Deuxième partie : ANALYSE DES DONNEES HYDROLOGIQUES

Chapitre III. PRESENTATION DE L'ANALYSE

1. DONNEE DISPONIBLE

Nous disposons des données de débits⁴² sur supports informatiques pour la plupart ainsi que des compléments papier pour les stations de la rivière Ikopa et ses deux affluents. Néanmoins, pour le site d'Antelomita, les données ne sont pas encore saisies.

Quant à la Mamba, les données sur les stations de contrôle ne sont pas disponibles dans notre étude faute d'insuffisance d'informations.

Ainsi, la présente étude concerne les bassins au droit de :

- La station de Behenjy pour la rivière Andromba
 - Les stations d'Andramasina, d'Ambatofotsy, et d'Ampitatafika pour la rivière Sisaony.
 - Les stations d'Ambohimanambola, d'Anosizato pour la rivière Ikopa.
 - Et enfin, la station de Bevomanga qui engendre le B.V supérieur de l'ikopa.
- Du fait que nous n'avons pas des données disponibles dans les stations le plus en aval de chacune des rivières (comme pour la rivière Andromba : Antsahalava ou Niakotsorano), notre étude n'intéressera donc que les stations citées plus haut. Cette étude est limitée dans les vingtaines dernières années pour les stations de la rivière Sisaony et Andromba, c'est à dire, nous travaillons sur des données beaucoup plus récentes. Cependant, elle sera faite sur les quarante dernières années sur l'lkopa.

La présentation des données hydrologiques disponibles sur le B.V supérieur de l'lkopa est portée en annexe n°7.

⁴² source : service de l'hydrologie

2. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE

Les données de base utilisées au cours de la présente étude, sont fondées sur les informations :

- A partir de la collecte des données relevées sur terrain (relevés hydrométriques, jaugeages et autres mesure complémentaire)
- L'analyse des données de base ainsi recueillies fait apparaître certaines lacunes dans les séries chronologiques intéressant la présente étude.

Aussi, est-il important de combler ces lacunes afin de poursuivre l'étude en question.

Pour ce faire, des méthodes de reconstitution ont été élaborées suivant la période de l'année.

Pour la saison pluvieuse et intermédiaire, la méthode utilisée est basée sur la relation $Q_{aval} = f(Q_{amont})$

Pour la saison sèche, la reconstitution a été établie à travers la loi de tarissement $Q = Q_0 * e^{-\alpha T}$

- Compléments des données par extraction HYDROM (données historiques et jaugeages).

La constitution de la base des données hydrométriques a été très délicate du fait de la multitude des supports, des pas de temps, des périodes...

La méthodologie adoptée a été la suivante :

- Transcription des fichiers HYDROM de hauteurs d'eau à pas de temps très variables en texte..
- Transformation des hauteurs d'eau en débits après validation des barèmes utilisés (analyse des jaugeages et barème historiques).
- Constitution pour chaque station des fichiers $H(t)$ et $Q(t)$, fichiers de hauteurs d'eau et de débits à pas de temps variables.
- Constitution pour chaque station des fichiers de débits moyens journaliers, Q_j selon la disponibilité de donnée.

Chapitre IV. GENERALITE

1. EQUIPEMENT DU B.V AU POINT DE VUE HYDROLOGIQUE

Dans notre zone d'étude, les équipements de suivi hydrologique sont constitués par des échelles limnimétriques et des limnigraphes. Celles-ci sont trouvées dans la figure n°13⁴³.

2. JAUGEAGE

Le but de la jaugeage est de déterminer le débit qui s'écoule à travers une section de contrôle donnée en vue d'établir la relation existant entre le débit et la hauteur d'eau observée à un limnimètre.

On peut avoir des divers types de station de jaugeage tels que :

- les stations à échelles limnimétriques
- les stations à déversoir

Il est à noter que les jaugeages effectués au cours des années d'observation ont été réalisés au moulinet.

2.1 Stations à échelles limnimétriques

Les hauteurs d'eau $H(t)$, lue sur une échelle limnimétrique ou enregistrées d'une façon continue par un limnigraphes dans une station peut se transformer en débit exprimé en fonction de temps de la forme $Q=f(t)$. Cette relation reportée graphiquement représente la courbe de tarage⁴⁴.

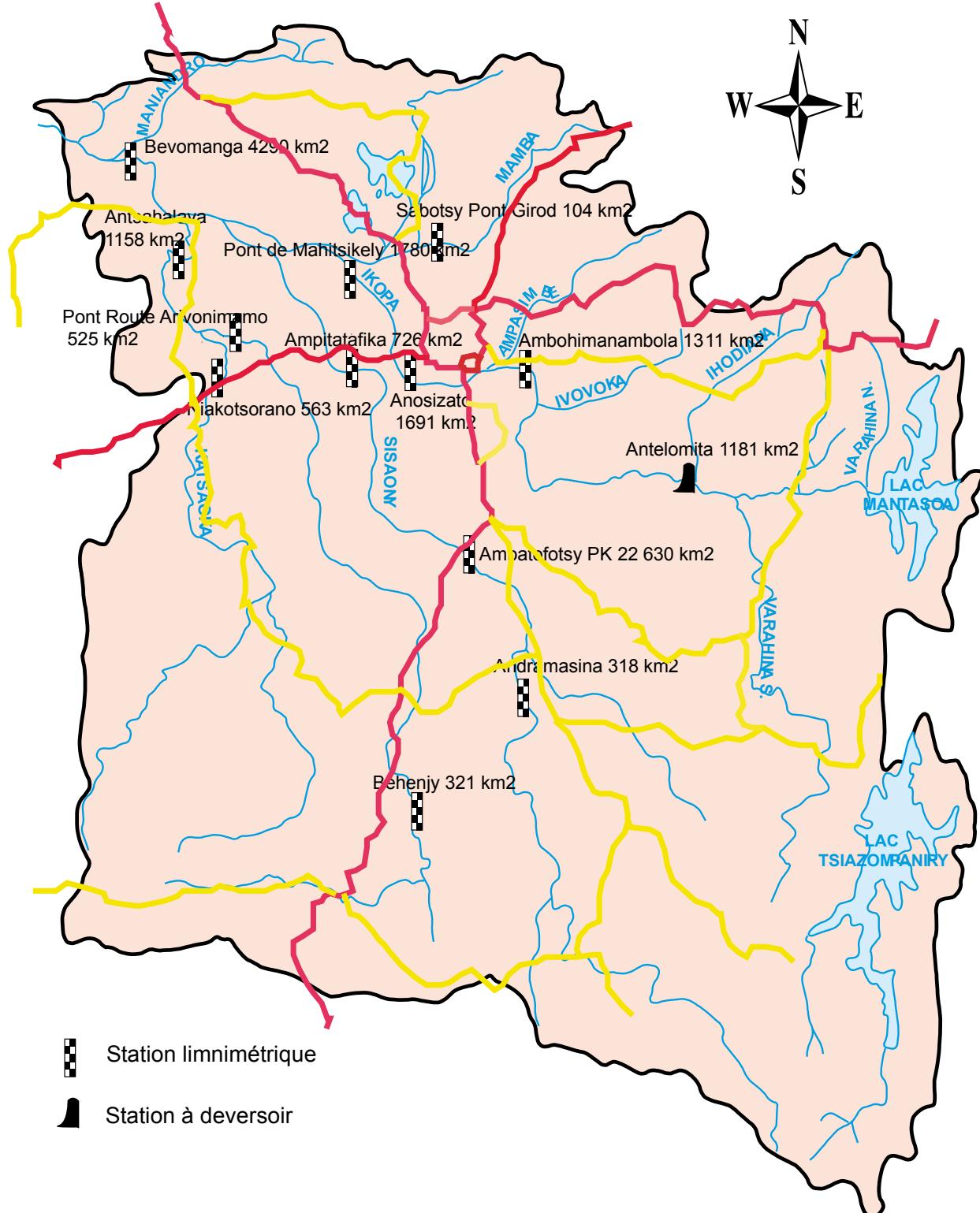
2.2 Stations à déversoir

Les stations à déversoir comportent soit un déversoir à mince paroi ou un déversoir à large seuil, implanté dans les lits du cours d'eau. Ce dispositif permet d'obtenir une relation entre l'altitude du plan d'eau dans leur bief amont et le débit qui le traverse. C'est par la formule hydraulique sur le débit du déversoir qu'on peut avoir la courbe de tarage. Parmi les stations à déversoir, on peut retrouver celle d'Antelomita dans le bassin d'étude.

⁴³ Bibliographie 17

⁴⁴ Bibliographie 16

CARTE DES STATIONS HYDROLOGIQUES



ECHELLE : 1 : 400 000

Figure n°13 : Carte des stations hydrologiques du bassin versant supérieur de l'lkopa

PARTIE III

SYNTHESE DES REGIMES HYDROLOGIQUES

Troisième partie : SYNTHESE DES REGIMES HYDROLOGIQUES

Chapitre V : APPORTS ANNUELS ET LEURS DISTRIBUTIONS MENSUELLES

1. APPORTS ANNUELS

Généralité

L'objectif principal de traitement des débits moyens annuels vise à faire ressortir les caractéristiques des apports afférents à chaque bassin et sous-bassin étudiés.

Les différents paramètres caractérisant les apports annuels considérés dans la présente étude sont les suivants :

- évolution chronologique
- valeurs statistiques
- évaluation

1.1 Evolution des apports annuels

Pour ce faire, nous disposons de chronique d'informations hydrologiques de 40 années consécutives relative à chacune des stations de contrôle hydrométrique dans la rivière Ikopa et 20 années consécutives pour les affluents.

L'objet de la présente partie, consiste à mettre en exergue l'évolution chronologique des apports annuels et de déceler au possible, les différentes tendances.

L'analyse se fera autour de la valeur normale (moyen inter annuel des débits) qui, dans un premier temps, sera interprété à l'aide des représentations graphiques de l'évolution des paramètres en question présentées ci-dessous.

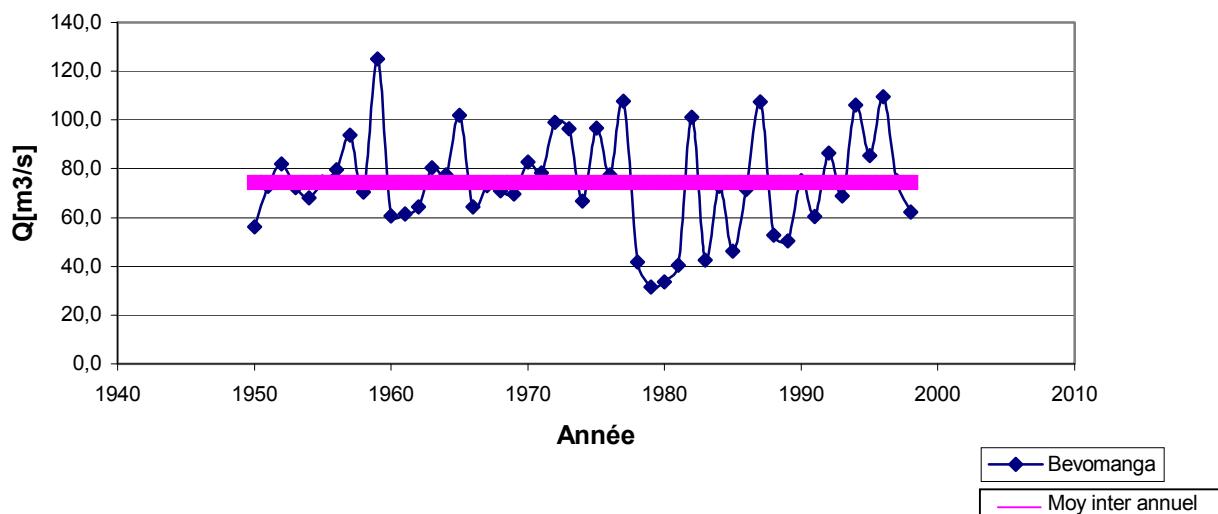


Figure n°14: Courbe chronologique des débits moyens annuels de Bevomanga

La courbe de la figure n°14 ne permet pas de mettre en évidence les différentes phases d'évolution hydrologiques. Tantôt, les tendances sont perturbées par des valeurs ponctuelles. Alors, on essaie de réduire la fluctuation des valeurs inter annuelles pour mieux voir apparaître les tendances de l'évolution. Pour ce faire, on tente de filtrer cette fluctuation par les coefficients de variation.

La figure n°15 ci-dessous décrit la tendance générale en vue de mettre en évidence la périodicité de l'apport annuel.

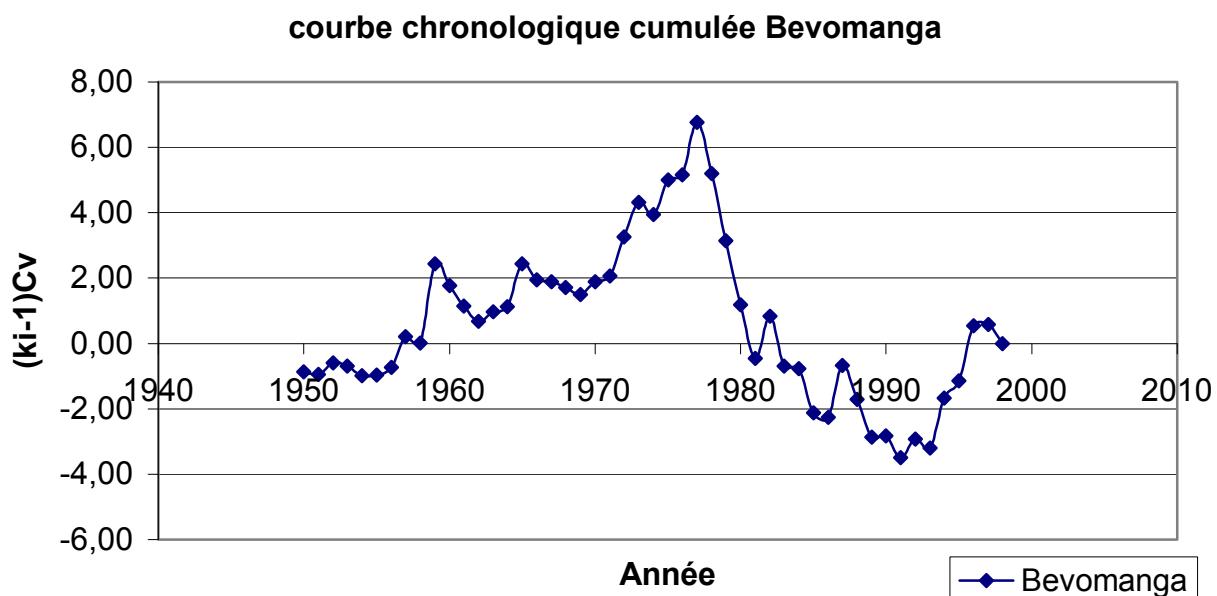


Figure n°15: Courbe chronologique des tendances de débit annuel

Les détails relatifs aux analyses des séries chronologiques des débits moyens inter annuels et les courbes chronologiques cumulées des autres stations se trouvent dans l'annexe n° 8.

1.2 Caractéristiques des apports annuels

L'objectif est de ressortir les apports annuels par les caractéristiques suivantes : - \bar{Q} , C_v , σ

- et les valeurs statistiques

Pour ce faire, les principales caractéristiques seront déterminées de la manière suivante :

- la moyenne arithmétique : $\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{N}$

Q_i : débit relatif à l'année i

N : nombre de l'échantillon

- le coefficient de variation : $C_v = \frac{\sigma}{\bar{Q}}$

avec $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{N-1}}$ pour $N < 30$ donc $Cv = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{N-1}}$

$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{N}}$ pour $N \geq 30$ donc $Cv = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{N}}$

σ : écart-type

et $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$

Aux résultats desquels on a :

| Stations | \bar{Q} | N | σ | C_v |
|-----------------------------|-----------|----|----------|-------|
| Ikopa à Ambohimanambola (1) | 29,4 | 49 | 8,997 | 0,31 |
| Ikopa à Bevomanga (2) | 74,4 | 49 | 20,886 | 0,28 |
| Sisaony à Andramasina (1') | 6,2 | 24 | 2,837 | 0,46 |
| Sisaony à Ambatofotsy (2') | 12,9 | 24 | 4,740 | 0,37 |
| Sisaony à Ampitatafika (3') | 14,8 | 24 | 4,370 | 0,30 |
| Andromba à Behenjy (1'') | 11,7 | 20 | 4,49 | 0,38 |

Tableau n°29 : Principales caractéristiques des apports annuels

Quant aux valeurs statistiques, elles seront déterminées par l'utilisation des lois d'ajustement théoriques suivantes, jugées adaptées aux échantillons étudiés :

- loi de GAUSS
- loi de GALTON
- loi de GUMBEL

Les tableaux n°30 à 38 résument les résultats des traitements, et les détails de calculs correspondants se trouvent dans l'annexe n°9 :

1.2.1 Résultats des études statistiques de l'Ikopa

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|-----|--------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 50,4 | 47,8 | 40,9 | 37,0 | 29,4 | 21,8 | 17,9 | 11,0 | 8,4 |
| | (3) | 123,1 | 117,2 | 101,1 | 92,2 | 74,4 | 56,6 | 47,7 | 31,6 | 25,7 |

Tableau n°30 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss (Ikopa)

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|-----|--------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 64,3 | 58,2 | 44,3 | 38,0 | 28,1 | 20,8 | 17,8 | 13,6 | 12,3 |
| | (3) | 150,8 | 138,4 | 109,4 | 96,0 | 74,1 | 57,2 | 50,1 | 39,6 | 36,4 |

Tableau n°31 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Ikopa)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|------|--------|-------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 52,7 | 47,8 | 36,5 | 31,3 | 23,5 | 17,6 | 15,2 | 11,5 |
| | (3) | 125,8 | 115,1 | 89,8 | 78,3 | 61,0 | 48,0 | 42,6 | 34,5 |

Tableau n°32 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Ikopa)

1.2.2- Résultats des études statistiques des affluents de l'IKOPA

a- SISAONY

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|--------|-------|------|-----|-----|
| | 100 | 50 | 5 | 10 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 12,8 | 12,0 | 9,8 | 8,6 | 6,2 | 3,8 | 2,6 | 0,4 |
| | (2') | 23,9 | 22,6 | 19,0 | 16,9 | 12,9 | 8,9 | 6,8 | 3,2 |
| | (3') | 25,0 | 23,8 | 20,4 | 18,5 | 14,8 | 11,1 | 9,2 | 5,8 |

Tableau n°33 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss (Sisaony)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | Sèche | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|--------|-------|------|------|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 14,5 | 12,9 | 9,3 | 7,8 | 5,5 | 3,8 | 3,2 | 2,3 |
| | (2') | 29,7 | 26,8 | 20,1 | 17,2 | 12,5 | 9,1 | 7,8 | 5,8 |
| | (3') | 30,0 | 27,6 | 21,9 | 19,2 | 14,9 | 11,5 | 10,1 | 8,0 |

Tableau n°34 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Sisaony)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 11,0 | 10,0 | 7,5 | 6,4 | 4,7 | 3,4 | 2,9 | 2,1 |
| | (2') | 22,5 | 20,4 | 15,6 | 13,4 | 10,1 | 7,6 | 6,6 | 5,0 |
| | (3') | 24,2 | 22,2 | 17,5 | 15,3 | 12,1 | 9,7 | 8,7 | 7,2 |

Tableau n°35 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Sisaony)

b- ANDROMBA

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|------------------------------|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) (1") | 22,2 | 20,9 | 17,5 | 15,5 | 11,7 | 7,9 | 5,9 | 2,5 | 1,2 |

Tableau n°36 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gauss (Andromba)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|------------------------------|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) (1") | 28,4 | 25,3 | 18,4 | 15,4 | 10,8 | 7,6 | 6,4 | 4,6 | 4,1 |

Tableau n°37 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Galton (Andromba)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|------------------------------|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) (1") | 21,5 | 19,4 | 14,5 | 12,3 | 9,0 | 6,5 | 5,4 | 3,9 | 3,4 |

Tableau n°38 : Résultats statistiques des apports annuels de période de retour différente selon Gumbel (Andromba)

Les chiffres se trouvant dans le tableau supra se rapportent aux différentes fréquences suivantes :

- 100 correspond à la fréquence centennale.
- 50 correspond à la fréquence cinquantennale.
- 10 correspond à une fréquence de période de retour 10 ans.
- 5 représente la fréquence de période de retour 5 ans.
- et médian représente la fréquence de période de retour 2 ans

1.3 Organisation spatiale des apports annuels

L'objectif de la présente partie est de savoir comment se repartissent les apports annuels dans l'espace du bassin considéré. D'autre part, la cartographie des paramètres permet d'évaluer les caractéristiques hydrologiques du B.V non jaugé. Et les paramètres mis en jeu sont les débits spécifiques et les lames écoulées.

Les débits moyens annuels pourraient être absolument transformés en lames écoulées annuelles⁴⁵ :

$$H = \frac{86,4x365xQ}{S}$$

$Q[m^3/s]$: débit moyen annuel

$H[mm]$: lame écoulée moyenne inter annuelle

$S[km^2]$: superficie du B.V

P : précipitation moyenne inter annuelle sur le B.V

H (humide) : lame décennale humide

H (sèche) : lame décennale sèche

K_e : coefficient d'écoulement

K_3 : coefficient d'irrégularité

γ_1 : coefficient d'asymétrie

γ_2 : coefficient d'aplatissement

q : débit spécifique

Les applications numériques de ces paramètres sont illustrées au tableau

présenté ci-après :

| cours d'eau | Station | S Km^2 | q $l/s/km^2$ | H mm | K_e % | H [mm] | | K_3 % | γ_1 | γ_2 |
|----------------|---------|-------------|-----------------|---------|------------|--------|-------|------------|------------|------------|
| | | | | | | humide | sèche | | | |
| Ikopa | (1) | 1311 | 22,4 | 707,2 | 0,51 | 988,9 | 425,5 | 2,32 | 2,89 | -0,13 |
| | (3) | 4290 | 17,3 | 549,9 | 0,39 | 780,0 | 354,5 | 2,2 | 3,01 | 0,11 |
| Sisaony | (1') | 318 | 19,5 | 614,9 | 0,44 | 1336,5 | 107,2 | 12,46 | 7,35 | 1,72 |
| | (2') | 630 | 20,5 | 645,7 | 0,46 | 1059,7 | 308,6 | 3,43 | 3,83 | 0,85 |
| | (3') | 726 | 20,5 | 647,2 | 0,46 | 776,4 | 311,0 | 2,5 | 3,96 | 0,75 |
| Andromba | (1'') | 321 | 36,4 | 1149,4 | 0,82 | 1714,1 | 584,8 | 2,93 | 3,03 | 0,39 |

Tableau n°39 : Répartition spatiale des apports annuels et différents

paramètres

Les détails de calculs correspondant aux valeurs du tableau supra sont rapportés dans l'annexe n°9.

D'un autre point de vue, l'humidité de l'année est déterminée par un coefficient d'hydraulicité : c'est le rapport de la lame annuelle à la lame moyenne inter annuelle.

⁴⁵ Bibliographie 9

Plus le coefficient d'hydraulicité est élevé, on a une année humide. Lorsque le coefficient d'hydraulicité est diminué, l'année est sèche.

Ainsi, les détails de calculs du rapport de la lame annuel se trouvent dans l'annexe n°9. Le coefficient d'hydraulicité est plus faible pour la rivière Ikopa en 1978/1979, et cela est marqué par les faibles débits pendant toute l'année. Par contre, en 1881/1882, ce coefficient est plus grand et les débits sont aussi plus élevés, atteignent même 100 m³/s.

1.4 Evaluation des apports annuels

Dans la présente étude, les apports annuels de chaque station seront évalués à partir des formules comme celle de CTGREF et de la méthode analogue.

1.4.1- Apport annuel d'après CTEGREF

Dans ce paragraphe, on essaiera de formuler le calcul des apports en cherchant les valeurs régionalisées correspondant à chaque bassin versant. Aux résultats desquels, l'évaluation des apports annuels des bassins non jaugés peut être obtenir à partir de la formule suivante.

$$Q_A = \frac{S}{31,5} \left(\frac{P_A}{B} \right)^{5/3} \left(\frac{Z_m}{100} \right)^{1/3}$$

où,

Q_A : débit annuel [m³/s]

Z_m : Z50% de la courbe hypsométrique [m]

B : valeur régionalisée

P_A : pluie annuelle tombée sur le bassin [mm]

Cette formule est simple à utiliser et prend en compte les caractéristiques physiques des B.V et les apports pluviométriques. Le but de la démarche qui s'en suit consiste à d'ajuster le paramètre B de la formule pour le B.V étudié.

Explicitement, nous calculerons B à partir de l'évolution des précipitations et des débits observés dans notre zone d'étude.

D'après le calcul effectué et présenté dans l'annexe n°9, il convient de noter les résultats à cet effet.

| Valeur régionalisée | (1) | (3) | (1') | (2') | (3') | (1'') |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Surface [km ²] | 1311 | 4290 | 318 | 630 | 726 | 321 |
| B moyenne | 48,9 | 56,3 | 54,8 | 52,3 | 51,3 | 37,6 |
| Q _A [m ³ /s] | 26,8 | 69,3 | 5,4 | 11,6 | 13,8 | 10,3 |
| B moyenne pondérée | 45,6 | 53,4 | 49,3 | 48,2 | 48,5 | 34,3 |
| Q _A [m ³ /s] | 30,0 | 75,6 | 6,5 | 13,3 | 15,1 | 12,1 |

Tableau n°40 : Valeurs régionalisée B de différentes stations et leurs apports annuels (CTGREF)

La comparaison des résultats ainsi obtenus permet de tirer les remarques suivantes :

- Primo, la valeur donnée par B=49 pour Bevomanga est surestimée par rapport aux valeurs que nous avons montrées dans le tableau n°40.
- Deuxièmement, tous les résultats de ce même tableau semblent se rapprocher des valeurs naturelles.
- Tertio, l'erreur absolue des apports annuels obtenus d'après la valeur régionalisée moyenne est 11%. Tandis que pour la valeur pondérée, elle est en moyenne à 3%.

Si on réfère à cette erreur, on peut dire que les résultats obtenus à partir de ces valeurs de B sont fiables.

En conséquence, pour le calcul de débit, on a adopté les valeurs régionalisées de B sur celle de la station de Bevomanga.

| Station | Surface [km ²] | B _{moy} | Q _A [m ³ /s] | B _{pond} | Q _A [m ³ /s] | B | Q _A [m ³ /s] |
|--------------------------|----------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|----|------------------------------------|
| B.V Supérieur de l'Ikopa | 4384 | 56,3 | 75,2 | 53,4 | 82,6 | 49 | 82,0 |

Tableau n°41 : Apports annuels du bassin de l'Ikopa à Farahantsana (CTGREF)⁴⁶

Le résultat de l'apport annuel de la valeur de B égale à 49 donnée dans la : « Fleuve et rivière de Madagascar » est un peu surestimé par rapport aux

⁴⁶ Bibliographie 9

valeurs distinctes de B obtenues dans le tableau supra. De ce fait, on pourrait appliquer ces résultats ci-dessus pour estimer l'apport annuel des sous bassins. La raison pour laquelle on adopte ces valeurs c'est : l'absence des valeurs régionalisées B dans quelques stations (à part celle de Bevomanga), et d'une série de débit sur une année hydrologique.

1.4.2- Apport annuel d'après les méthodes analogues

Dans un premier temps, on a tenté de présenter la relation entre la valeur de débit et la variation de la surface. Aux résultats desquels, on a abouti à l'équation suivante.

$$Y : Q_A = 0,018 * S \quad \text{avec } R^2=0,9745$$

La valeur de coefficient de régression montre qu'il existe un lien très fort entre le débit et la surface.

Cette relation est probablement utilisée pour les surfaces plus grande, 300 km² le minimum. Plus la surface est grande, plus cette relation est efficace, parce que, l'erreur calculée varie respectivement de 0% à 24% pour la surface à la station de Bevomanga (4290 km²) et celle d'Andramasina (318 km²). Cette erreur est exprimée par :

$$e = \frac{|Q_o - Q_c|}{Q_o}$$

Où,

Q_o est la valeur observée d'après l'étude statistique des débits à chaque station.

Q_c est la valeur de débit calculée à partir de la relation ci-dessus.

A la suite de cette démarche, on a essayé d'établir la relation suivante : une méthode utilisée pour avoir un débit de référence à partir d'une station près de l'exutoire, afin d'obtenir les apports annuels des autres B.V et surtout pour les non jaugés.

La formule s'écrit :

$$Q_A = q_{ref} * S_{B.V} \quad \text{où,}$$

$S_{B.V}$: superficie du B.V étudiée

Pour calculer ce débit de référence, on utilise la formule suivante

$$\frac{Q_F}{S} = q_{ref}$$

Q_F : Débit interannuel de la station de Bevomanga : $74,4 \text{ m}^3/\text{s}$

S : surface du B.V à Bevomanga : 4290 km^2

q_{ref} : débit de référence qui est égale à $0,018$

A partir des méthodes analogues, les résultats des apports annuels tirés des formules $Q_A = 0,018 * S$ (Y) et $Q_A = Q_{ref} * S_{B.V}$ (méthode de Station de Référence) sont les suivants :

| Stations | $S_{B.V} [\text{km}^2]$ | $Q_A [\text{m}^3/\text{s}]$ | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|------|
| | | Y | S.R |
| Ambohimanambola | 1311 | 26,0 | 22,7 |
| Andramasina | 318 | 8,8 | 5,5 |
| Ambatofotsy | 630 | 14,2 | 10,9 |
| Ampitatafika | 726 | 15,9 | 12,6 |
| Behenjy | 321 | 8,9 | 5,6 |
| Bevomanga | 4290 | 77,6 | 74,4 |
| B.V Supérieur de l'lkopa | 4384 | 79,2 | 75,8 |

Tableau n°42 : Apports annuels selon les méthodes analogues

Après comparaison, les valeurs de l'ajustement des lois selon Gauss, des apports annuels à partir de l'équation et d'après la station de référence semblent être respectivement modérées, légèrement faibles et plus faible. Entre autre, les résultats des apports annuels calculés à partir des valeurs de B moyenne sont faibles, tandis que ceux trouvés à partir de B moyenne pondérée sont un peu élevés.

L'ajustement des lois exige nettement l'application d'une série de débits sur une année hydrologique. La formule de CTEGREF fait introduire la pluie moyenne annuelle et la surface. Et la méthode analogue fait intervenir le débit de station de référence. Par conséquent, on suggère de prendre les valeurs de l'ajustement des lois comme apports annuels.

Mais si on est devant un bassin non jugé, l'apport annuel calculé d'après CTGREF sera le mieux modéré.

2. DISTRIBUTION SAISONNIERE

La distribution saisonnière a pour objectif de mettre en évidence la répartition saisonnière des apports dans chaque B.V étudié et par la suite, de déterminer les valeurs des coefficients de répartition relatives à chaque station. Entre autres, on essayera d'illustrer la variation des débits moyens mensuels sous différentes formes de courbes.

2.1 Coefficient de répartition

On applique la formule suivante pour calculer les coefficients de répartition supposés adéquats aux stations afin d'évaluer les apports mensuels pour des B.V non jaugés.

$$Q_J = \frac{Q_A * R_J * 12}{100}$$

Q_J : débit mensuel

R_J : coefficient de répartition à chaque mois

Q_A : débit annuel

A partir de la formule ci-dessus, on tire le coefficient de répartition :

$$R_J = \frac{Q_J * 100}{Q_A * 12}$$

D'après les calculs détaillés portés à l'annexe n°9, les tableaux n°43 et 44 désignés ci-après résument les résultats de calcul des coefficients de répartition saisonnière et les débits y afférents.

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|---------|------|------|------|------|------|-------|-----|------|--------|------|------|------|
| A/BOLA | 7,9 | 10,4 | 13,0 | 13,3 | 12,0 | 7,4 | 6,1 | 5,9 | 5,8 | 6,0 | 5,9 | 6,3 |
| BEVO | 4,9 | 10,6 | 15,9 | 18,1 | 16,5 | 9,7 | 6,0 | 4,8 | 4,2 | 3,6 | 3,0 | 2,7 |
| A/SINA | 5,5 | 13,9 | 14,7 | 19,8 | 14,1 | 7,4 | 5,1 | 4,3 | 4,2 | 3,9 | 3,4 | 3,9 |
| A/FOTSY | 5,7 | 13,6 | 20,4 | 17,1 | 14,6 | 8,1 | 4,9 | 3,8 | 3,4 | 3,0 | 2,4 | 3,1 |
| A/FIKA | 4,4 | 13,6 | 19,9 | 17,0 | 15,5 | 9,6 | 5,0 | 3,7 | 3,3 | 2,9 | 2,4 | 2,6 |
| BEHE | 5,0 | 9,4 | 15,6 | 17,4 | 13,8 | 9,7 | 6,5 | 5,1 | 4,8 | 4,4 | 3,9 | 4,5 |

Tableau n°43 : Coefficients de répartition saisonnière des stations du bassin

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| A/BOLA | 28,3 | 37,0 | 46,2 | 47,3 | 42,8 | 26,4 | 21,8 | 21,0 | 20,7 | 21,3 | 21,1 | 22,5 |
| BEVO | 45,0 | 97,9 | 147, 0 | 168, 1 | 153, 1 | 89,9 | 55,6 | 44,1 | 38,6 | 33,6 | 28,2 | 25,2 |
| A/SINA | 4,9 | 12,2 | 12,8 | 17,3 | 12,3 | 6,4 | 4,5 | 3,8 | 3,6 | 3,4 | 2,9 | 3,4 |
| A/FOTSY | 9,3 | 22,4 | 33,5 | 28,1 | 24,0 | 13,2 | 8,0 | 6,2 | 5,6 | 4,9 | 4,0 | 5,2 |
| A/FIKA | 6,6 | 20,4 | 29,9 | 25,5 | 23,3 | 14,5 | 7,5 | 5,5 | 5,0 | 4,3 | 3,6 | 3,9 |
| BEHE | 7,0 | 13,2 | 21,8 | 24,5 | 19,4 | 13,6 | 9,1 | 7,2 | 6,8 | 6,2 | 5,5 | 6,3 |

Tableau n°44 : Débits moyens mensuels correspondant aux coefficients de répartition saisonnière calculés

Par contre, les coefficients de répartition⁴⁷ et les débits mensuels respectifs pour les hautes terres centrales (H.T.C) proposés par le « Fleuve et rivière de Madagascar » seront montrés ci-dessous.

| H.T.C | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|----------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| R _J | 4,8 | 12,8 | 16,9 | 16,4 | 17,0 | 9,7 | 5,7 | 4,1 | 3,7 | 3,4 | 2,6 | 2,4 |

Tableau n°45 : Coefficients de répartition saisonnière donnée par « Fleuve et rivière de Madagascar »

Quant aux résultats obtenus à partir des coefficients de répartition proposés dans la publication « Fleuve et rivière de Madagascar », ils sont consignés aux tableaux présentés ci-après.

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| A/BOLA | 17,1 | 45,6 | 60,2 | 58,4 | 60,6 | 34,6 | 20,3 | 14,6 | 13,2 | 12,1 | 9,3 | 8,6 |
| BEVO | 44,5 | 118,6 | 156,6 | 151,9 | 157,5 | 89,9 | 52,8 | 38,0 | 34,3 | 31,5 | 24,1 | 22,2 |
| A/SINA | 4,2 | 11,2 | 14,8 | 14,4 | 14,9 | 8,5 | 5,0 | 3,6 | 3,2 | 3,0 | 2,3 | 2,1 |
| A/FOTSY | 7,9 | 21,0 | 27,8 | 27,0 | 27,9 | 15,9 | 9,4 | 6,7 | 6,1 | 5,6 | 4,3 | 3,9 |
| A/FIKA | 7,2 | 19,2 | 25,4 | 24,6 | 25,5 | 14,6 | 8,6 | 6,2 | 5,6 | 5,1 | 3,9 | 3,6 |
| BEHE | 11,1 | 29,5 | 39,0 | 37,9 | 39,2 | 22,4 | 13,2 | 9,5 | 8,5 | 7,8 | 6,0 | 5,5 |

Tableau n°46 : Débits moyens mensuels correspondant au coefficient de répartition saisonnière donnée par « Fleuve et rivière de Madagascar »

En interprétant les deux tableaux donnant les coefficients de répartitions, ainsi que leurs débits calculés respectifs. Les valeurs tirées à partir du tableau n°46 sont

⁴⁷ Bibliographie 9

relativement surestimées pendant les périodes de pluies, en opposé de celles de la saison sèche.

En outre, les résultats des apports mensuels obtenus d'après le tableau n°44 se rapprochent plutôt des valeurs statistiques (Q_2) présentés aux tableaux n°47 à 52 portés ci-dessous. En conséquence, on peut en conclure que les coefficients de répartitions proposés par la présente étude relative à chacun des sous bassin pourraient être adopté pour le B.V tout entier.

2.2 Résultats des apports mensuels de chaque station

2.2.1- Valeurs statistiques des apports mensuels de l'Ikopa

Apports mensuels [m³/s] :

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| Q₁₀₀ | 46,5 | 66,3 | 90,8 | 105,5 | 100,7 | 53,4 | 41,7 | 40,6 | 40,2 | 40,3 | 39,8 | 40,2 |
| Q₅₀ | 44,1 | 62,6 | 85,3 | 98,5 | 93,8 | 50,2 | 39,3 | 38,2 | 37,9 | 38,0 | 37,6 | 38,0 |
| Q₁₀ | 37,5 | 52,4 | 70,4 | 79,3 | 74,9 | 41,3 | 32,7 | 31,8 | 31,5 | 31,8 | 31,4 | 32,0 |
| Q₅₀ | 33,8 | 46,7 | 62,1 | 68,5 | 64,3 | 36,4 | 29,1 | 28,1 | 27,9 | 28,3 | 27,9 | 28,6 |
| Q₂ | 26,5 | 35,5 | 45,6 | 47,3 | 43,4 | 26,6 | 21,8 | 21,0 | 20,8 | 21,4 | 21,1 | 21,9 |

Tableau n°47 : Valeurs statistiques des apports mensuels de l'Ikopa à

Ambohimanambola

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| Q₁₀₀ | 88,2 | 192,0 | 300,9 | 336,9 | 285,9 | 204,1 | 90,0 | 67,3 | 59,4 | 53,3 | 46,4 | 45,5 |
| Q₅₀ | 82,7 | 180,3 | 282,0 | 316,0 | 269,2 | 190,4 | 85,5 | 64,2 | 56,6 | 50,7 | 44,0 | 42,9 |
| Q₁₀ | 67,5 | 147,9 | 230,3 | 258,6 | 223,1 | 152,9 | 73,1 | 55,7 | 49,0 | 43,5 | 37,4 | 35,7 |
| Q₅₀ | 59,1 | 129,8 | 201,3 | 226,5 | 197,4 | 131,9 | 66,2 | 50,9 | 44,7 | 39,6 | 33,8 | 31,7 |
| Q₂ | 42,4 | 94,1 | 144,2 | 163,1 | 146,5 | 90,4 | 52,5 | 41,5 | 36,3 | 31,7 | 26,5 | 23,8 |

Tableau n°48 : Valeurs statistiques des apports mensuels de l'Ikopa à

Bevomanga

2.2.2- Sisaony

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|------------------------|------|------|--------|------|------|-------|-----|------|--------|------|------|------|
| Q₁₀₀ | 7,7 | 30,6 | 24,2 | 36,2 | 37,7 | 17,6 | 9,9 | 8,8 | 8,2 | 7,5 | 6,7 | 7,6 |
| Q₅₀ | 7,2 | 28,2 | 22,6 | 33,6 | 34,5 | 16,2 | 9,2 | 8,1 | 7,6 | 6,9 | 6,2 | 7,0 |
| Q₁₀ | 5,9 | 21,4 | 18,,,0 | 26,6 | 26,0 | 12,2 | 7,1 | 6,3 | 5,9 | 5,4 | 4,8 | 5,5 |
| Q₅₀ | 5,1 | 17,6 | 15,4 | 22,7 | 21,2 | 10,0 | 6,0 | 5,2 | 4,9 | 4,6 | 4,0 | 4,7 |
| Q₂ | 3,6 | 10,1 | 10,3 | 14,9 | 11,8 | 5,6 | 3,8 | 3,2 | 3,1 | 2,9 | 2,5 | 3,0 |

Tableau n°49 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à

Andramasina

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct |
|------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|------------|
| Q₁₀₀ | 17,4 | 54,7 | 82,0 | 51,1 | 73,1 | 27,3 | 19,8 | 13,5 | 10,6 | 8,9 | 8,8 | 11,8 |
| Q₅₀ | 16,3 | 50,6 | 76,1 | 48,1 | 67,2 | 25,4 | 18,4 | 12,6 | 9,9 | 8,4 | 8,2 | 11,0 |
| Q₁₀ | 13,1 | 39,3 | 59,7 | 39,8 | 51,1 | 20,3 | 14,4 | 10,1 | 8,2 | 7,0 | 6,6 | 8,7 |
| Q₅₀ | 11,4 | 33,0 | 50,5 | 35,2 | 42,1 | 17,5 | 12,1 | 8,7 | 7,2 | 6,2 | 5,7 | 7,4 |
| Q₂ | 7,9 | 20,6 | 32,4 | 26,0 | 24,3 | 11,9 | 7,7 | 5,9 | 5,2 | 4,6 | 3,9 | 4,9 |

Tableau n°50 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à

Ambatofotsy

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Q₁₀₀ | 16,0 | 60,7 | 93,1 | 58,5 | 65,3 | 34,5 | 17,9 | 14,9 | 12,2 | 10,2 | 8,6 | 10,6 |
| Q₅₀ | 14,9 | 56,3 | 86,4 | 55,1 | 60,8 | 32,4 | 16,8 | 13,9 | 11,5 | 9,6 | 8,0 | 9,9 |
| Q₁₀ | 11,9 | 44,1 | 67,9 | 45,9 | 48,6 | 26,6 | 13,8 | 11,1 | 9,3 | 7,9 | 6,6 | 7,8 |
| Q₅₀ | 10,2 | 37,3 | 57,5 | 40,7 | 41,7 | 23,4 | 12,1 | 9,6 | 8,1 | 6,9 | 5,8 | 6,7 |
| Q₂ | 6,9 | 23,9 | 37,1 | 30,5 | 28,2 | 17,0 | 8,8 | 6,5 | 5,8 | 5,0 | 4,2 | 4,4 |

Tableau n°51 : Valeurs statistiques des apports mensuels de Sisaony à

Ampitatafika

2.2.3 Andromba

| | Nov. | Déc. | Jan | Fév. | Mar | Avril | Mai | Juin | Juill. | Août | Sept | Oct. |
|------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Q₁₀₀ | 15,0 | 29,6 | 48,1 | 51,4 | 44,0 | 24,5 | 19,7 | 11,1 | 9,3 | 8,0 | 6,6 | 10,7 |
| Q₅₀ | 14,0 | 27,7 | 45,0 | 48,2 | 41,0 | 23,2 | 18,3 | 10,5 | 8,8 | 7,6 | 6,3 | 9,9 |
| Q₁₀ | 11,4 | 22,2 | 36,3 | 39,3 | 32,9 | 19,6 | 14,5 | 8,6 | 7,4 | 6,5 | 5,4 | 7,8 |
| Q₅₀ | 9,9 | 19,2 | 31,4 | 34,3 | 28,3 | 17,6 | 12,3 | 7,6 | 6,7 | 5,8 | 4,9 | 6,7 |
| Q₂ | 7,0 | 13,2 | 21,8 | 24,5 | 19,3 | 13,6 | 8,1 | 5,5 | 5,2 | 4,6 | 3,9 | 4,4 |

Tableau n°52 : Valeurs statistiques des apports mensuels d'Andromba à

Behenjy

En constatant les valeurs présentées aux tableaux supra, les apports mensuels pendant la période de pluies représentent les 60% à 80% des débits total annuel, par contre, le reste ne représente que 20 à 40%.

2.3 Représentation graphique des valeurs statistiques des apports mensuels.

L'objet de la représentation graphique consiste à mettre en évidence l'hydrogramme type de l'Ikopa.

Les courbes des débits moyens mensuels caractérisant le régime de cours d'eau sur la série d'année sont portées à l'annexe n° 9, les débits moyens mensuels

inter annuels de chaque mois de l'année y sont représentés, ainsi que la variation inter annuelle du régime.

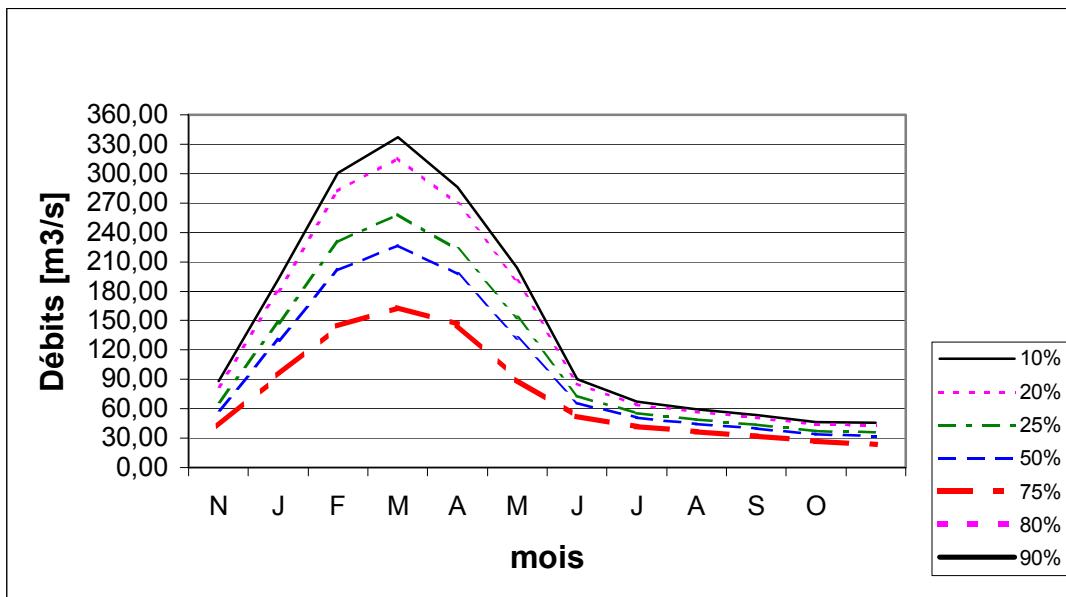


Figure n°16 : Débit moyen mensuel classé d'après leur fréquence au dépassement (Bevomanga)

En effet, la partie de la courbe où les débits augmentent de novembre en février et descendent jusqu'en avril correspond à la période où la pluie est abondante. A partir du mois de mai, la courbe continue à descendre : c'est la saison sèche.

Chapitre VI : CRUES

Généralité

Le phénomène de formation d'une crue est lié aux différents facteurs. Les principaux facteurs déterminant sont la surface du bassin versant et l'intensité de la pluie⁴⁸. D'autres facteurs devront faire aussi l'objet d'une considération particulière.

Généralement, l'origine des crues exceptionnelles est souvent liée aux passages des cyclones ou la zone de convergence intertropicale (zcit) où les vents froids rencontre les masses d'air chaud. Autrement dit, les fortes crues proviennent des fortes pluies engendrées par le passage cyclonique ou de zone de convergence intertropicale dans le bassin.

Dans ce chapitre, l'objectif consiste à faire ressortir les caractéristiques de crues, les temps caractéristiques, les coefficients de ruissellement, ainsi que les impacts environnementaux, et, aussi d'estimer les débits de crues d'après différentes formules.

1. CARACTERISTIQUES DES CRUES

Les différentes formes de représentation des débits de crues sont : les débits maximum (Q_{\max}), et les débits fréquentiels (Q_f). En effet, l'ajustement des lois théoriques bien définies pour les valeurs statistiques permet d'obtenir les débits fréquentiels. Pour ce faire, les trois lois suivantes ont été adoptées :

- LOI DE GAUSS
- LOI DE GALTON
- LOI DE GUMBEL

1.1 Ikopa

Le B.V de l'lkopa est le plus important en ce qui concerne surtout la protection de la plaine d'Antananarivo. Ce sont en effet les crues qui sont à l'origine des principaux dégâts, en particulier en zone urbaine.

⁴⁸ Bibliographie 11

Le B.V de l'Ikopa comprend les sous bassins de Varahina Nord (1284 km^2), celui de l'Ikopa à Antelomita (500 km^2) et celui de la Mamba (320 km^2), soit au total 2104 km^2 .

Débit maximum (source : service de l'hydrologie)

Suivant les données disponibles présentées à l'annexe n°10, les crues sont caractérisées par un débit maximum de $563 \text{ m}^3/\text{s}$, observé en mars 1959 à Bevomanga, avec une valeur moyenne de $322 \text{ m}^3/\text{s}$ de 1949-1998 et un débit minimum $58,8 \text{ m}^3/\text{s}$, observé en décembre 1977 à Ambohimamanambola.

Résultats de l'étude statistique

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------------|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m^3/s) | (1) | 388,2 | 361,1 | 286,8 | 245,3 | 163,2 | 81,2 | 39,7 | - | - |
| | (2) | 332,9 | 311,3 | 251,7 | 218,5 | 152,7 | 87,0 | 53,7 | - | - |
| | (3) | 553,1 | 526,4 | 453,1 | 412,1 | 331,1 | 250,1 | 209,1 | 135,8 | 109,1 |

Tableau n°53 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GAUSS (Ikopa)

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | Sèche | | | |
|--------------------------------|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m^3/s) | (1) | 491,5 | 423,2 | 280,3 | 222,7 | 141,3 | 89,7 | 71,3 | 47,2 | 40,6 |
| | (2) | 477,9 | 410,1 | 269,1 | 212,7 | 133,6 | 83,9 | 66,3 | 43,5 | 37,4 |
| | (3) | 632,9 | 582,8 | 464,3 | 409,0 | 318,3 | 247,7 | 218,2 | 173,9 | 160,1 |

Tableau n°54 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GALTON (Ikopa)

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------------|-----|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m^3/s) | (1) | 316,9 | 283,1 | 203,4 | 167,2 | 112,6 | 71,6 | 54,6 | 29,0 | 20,8 |
| | (2) | 306,8 | 273,8 | 196,0 | 160,2 | 107,3 | 67,2 | 50,7 | 25,7 | 17,7 |
| | (3) | 534,5 | 491,4 | 389,8 | 343,6 | 274,1 | 221,7 | 200,2 | 167,5 | 157,1 |

Tableau n°55 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (Ikopa)

1.2 Affluents de l'Ikopa : SISAONY et ANDROMBA

Le B.V de la Sisaony couvre 741 km². Des débordements de la Sisaony se déversent sur une partie de la zone urbanisée du grand Tana. De plus les quantités d'eau apportées par les crues contribuent à relever le niveau aval de l'Ikopa en amont du seuil rocheux qui constitue la fermeture de la plaine, et intervient de ce fait dans les conditions aux limites de l'observation des crues de l'Ikopa proprement dit.

Débit maximum (source : service de l'hydrologie)

A partir des données disponibles de l'annexe n°10, les crues sont caractérisées par un débit maximum de 418 m³/s, observé en mars 1959 à Andramasina, avec une valeur moyenne de 116 m³/s de 1949-1998 et un débit minimum 27,8 m³/s, observé en décembre 1990 à Andramasina.

Résultats de l'étude statistique

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 320,8 | 296,5 | 229,9 | 192,7 | 119,2 | 45,6 | 8,4 | - | - |
| | (3') | 267,6 | 251,9 | 208,5 | 184,2 | 136,4 | 88,5 | 64,2 | 20,8 | 5,1 |
| | (1'') | 180,4 | 171,7 | 147,7 | 134,3 | 107,9 | 81,4 | 68,0 | 44,1 | 35,4 |

Tableau n°56 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de Gauss (Sisaony et Andromba)

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 450,4 | 374,3 | 225,0 | 169,3 | 96,5 | 55,0 | 41,4 | 24,9 | 20,7 |
| | (3') | 330,9 | 294,6 | 214,2 | 179,1 | 125,8 | 88,4 | 74,0 | 53,7 | 47,8 |
| | (1'') | 207,3 | 190,7 | 151,6 | 133,4 | 103,5 | 80,4 | 70,7 | 56,2 | 51,7 |

Tableau n°57 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 253,1 | 223,8 | 154,8 | 123,4 | 76,2 | 40,6 | 26,0 | 3,8 |
| | (3') | 247,5 | 223,7 | 167,8 | 142,4 | 104,1 | 75,3 | 63,4 | 45,4 |
| | (1'') | 162,3 | 150,2 | 121,8 | 108,9 | 89,4 | 74,8 | 68,7 | 59,6 |

Tableau n°58 : Valeurs des débits de crues de périodes de retour différentes selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba)

2. ESTIMATION DES DEBITS MAXIMUMS DE CRUES

Cette partie décrit la formulation des débits maxima de crues, l'estimation des débits maxima de crues dans les bassins non jaugés. De même, elle fait apparaître les temps caractéristiques ainsi que les valeurs de coefficient correspondant aux B.V étudiés.

2.1 Temps caractéristiques

2.1.1-Temps de concentration :

Le temps de concentration d'un B.V représente le temps que mette une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. L'estimation du temps de concentration d'un bassin se fait habituellement à l'aide d'un échantillon de crues (pluies et débits), au pas de temps horaire si possible. Le fait de ne pas disposer de données pluviométriques à pas de temps inférieurs à la demi-journée nous empêche de réaliser cette estimation. Ainsi, on a recouru à des certaines formules comme celle de PASSINI, VENTURA, de l'Etat de Californie à titre d'information⁴⁹.

- Passini :

$$t_c = 0,108 * \frac{\sqrt[3]{S * L_e}}{\sqrt{I}}$$

tc : temps de concentration

S : surface du B.V [km²]

L_e : longueur du cours d'eau [km]

⁴⁹ Bibliographie 4

I : pente moyenne en [m/m]

- Ventura :

$$t_c = 0,1272 * \sqrt{\frac{S}{I}}$$

- Etat de Californie :

$$t_c = 3,98 * \left(\frac{Le}{\sqrt{I}} \right)^{0,77}$$

| B.V | Passini | Ventura | Etat de Californie |
|-----------------|---------|---------|--------------------|
| Ikopa Supérieur | 8j 18h | 7j 3h | 1j 11h |
| Sisaony | 5j 11h | 4j 3h | 1j 6h |
| Andromba | 4j 3h | 3j 10h | 22h |

Tableau n°59 : Valeurs de temps de concentration de chaque rivière d'après les formules empiriques

Les formules sus-référencées sont surtout utilisées pour les B.V de petite surface. Par conséquent, les valeurs trouvées dans le tableau nous montrent simplement les résultats des formules.

2.1.2-Temps de base :

Le temps de base ou durée de ruissellement : c'est la durée comprise entre le début et la fin du ruissellement de surface. Généralement, il est égal au temps de concentration augmenté de la durée t de l'averse. Autrement dit, c'est la durée du temps de la montée et de la descente de crue.

Il est de la forme : $t_b = t_c + t$. Mais quelque fois on l'exprime par : $t_b = 2t_c$

2.2-Valeurs caractéristiques des crues

Par ailleurs, le déroulement d'une crue dans la section d'un cours d'eau peut être matérialisé par le tracé de l'hydrogramme de crue. Ceci est une fonction de débit par rapport au temps. A partir de cette hydrogramme, on soustrait les résultats relatifs aux stations⁵⁰ suivant les tableaux ci-dessous.

⁵⁰ source : service de l'hydrologie

| Observation : 1969/1970 | Bevomanga | Ampitatafika | Behenjy |
|---------------------------------|------------|--------------|------------|
| Début de crue | 10/12/1969 | 6/02/1970 | 10/03/1970 |
| Fin de crue | 02/02/1970 | 17/02/1970 | 20/03/1970 |
| Temps de monté [Jours, heures] | 28J 6H | 2J 20H | 3J 12H |
| Temps de base [Jours, heures] | 54J 6H | 10J 22H | 10J 6H |
| Débit max écoulé [m^3/s] | 442,0 | 51,9 | 44,0 |
| Débit max ruisselé [m^3/s] | 350,0 | 38,0 | 35,4 |
| Volume écoulé [10^6m^3] | 1114,0 | 27,4 | 14,5 |
| Volume ruisselé [10^6m^3] | 692,6 | 14,3 | 6,6 |
| Lame écoulée [mm] | 259,8 | 37,7 | 45,0 |
| Lame ruisselée [mm] | 161,5 | 19,7 | 20,7 |
| Débit spécifique [$l/s/km^2$] | 103,0 | 71,5 | 137,0 |

Tableau n°60 : Valeurs caractéristiques des crues de 1969/1970

| Observation : 1992/1993 | Bevomanga | Ampitatafika | Behenjy |
|---------------------------------|------------|--------------|------------|
| Début de crue | 20/02/1993 | 07/02/1993 | 18/11/1992 |
| Fin de crue | 24/03/1993 | 14/02/1993 | 28/11/1992 |
| Temps de monté [Jours, heures] | 16J | 1J 12H | 2J |
| Temps de base [Jours, heures] | 32J | 7J 6H | 9J 18 H |
| Débit max écoulé [m^3/s] | 224,0 | 95,0 | 78,6 |
| Débit max ruisselé [m^3/s] | 115,0 | 83,7 | 69,5 |
| Volume écoulé [10^6m^3] | 428,3 | 18,5 | 22,3 |
| Volume ruisselé [10^6m^3] | 128,1 | 10,8 | 15,0 |
| Lame écoulée [mm] | 99,8 | 25,5 | 69,4 |
| Lame ruisselée [mm] | 29,9 | 14,9 | 46,9 |
| Débit spécifique [$l/s/km^2$] | 52,2 | 131,0 | 245,0 |

Tableau n°61 : Valeurs caractéristiques des crues de 1992/1993

| Observation : 1995/1996 | Bevomanga | Ampitatafika | Behenjy |
|---------------------------------|------------|--------------|------------|
| Début de crue | 17/01/1996 | 23/12/1995 | 24/12/1995 |
| Fin de crue | 23/02/1996 | 01/01/1996 | 30/12/1995 |
| Temps de monté [Jours, heures] | 18J 12H | 4J 6H | 2J 12H |
| Temps de base [Jours, heures] | 37J | 9J | 5J 18H |
| Débit max écoulé [m^3/s] | 392,0 | 162,0 | 117,0 |
| Débit max ruisselé [m^3/s] | 196,0 | 149,0 | 95,5 |
| Volume écoulé [10^6m^3] | 972,9 | 45,0 | 25,5 |
| Volume ruisselé [10^6m^3] | 344,8 | 35,4 | 14,3 |
| Lame écoulée [mm] | 226,8 | 62,0 | 79,4 |
| Lame ruisselée [mm] | 80,4 | 48,7 | 44,6 |
| Débit spécifique [$l/s/km^2$] | 91,4 | 223,0 | 364,0 |

Tableau n°62 : Valeurs caractéristiques des crues de 1995/1996

En considérant les trois tableaux ci-dessus, le temps de base varie de 30 à 55 jours pour la rivière Ikopa à Bevomanga et cela peut être même descendre jusqu'à 20 jours pour certaine période. Et pour la rivière Sisaony à Ampitatafika et Andromba à Behenjy, le temps de base pour un hydrogramme de crue est environ de 5 à 10 jours.

2.3. Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement dépend des caractéristiques géologiques, géomorphologiques, de la couverture du sol, et de la pente du B.V. Un terrain perméable, une couverture végétale dense abaissent considérablement le coefficient de ruissellement.

D'autre part, le coefficient de ruissellement diminue lorsque la superficie du B.V augmente, il varie dans le même sens que la pente du bassin.

2.3.1 Expression de coefficient de ruissellement moyen

La formule tirée dans l'œuvre « Fleuve et rivière de Madagascar » $C=\mu S^{-n}$ sera appliquée dans ce paragraphe.

Et, on prendra μ égale à 75,6 et n est égale à 0,123 pour le B.V supérieur de l'lkopa, ces valeurs sont aussi tirées de la « Fleuve et rivière de Madagascar ».

| Station | Superficie [km ²] | C [%] |
|--------------------------|-------------------------------|-------|
| Ikopa à Ambohimanambola | 1311 | 31,26 |
| Ikopa à Anosizato | 1691 | 30,30 |
| Ikopa à Bevomanga | 4290 | 27,02 |
| Sisaony à Andramasina | 318 | 37,22 |
| Sisaony à Ampitatafika | 726 | 33,62 |
| Andromba à Behenjy | 321 | 37,17 |
| B.V supérieur de l'lkopa | 4384 | 26,95 |

Tableau n°63 : Coefficient de ruissellement moyen

Entre autres, comme nous avons déjà dit dans le chapitre I-3, pour un bassin de 30% à 60% imperméable en surface ou à faible profondeur de 20 à 50 cm, ou moins de 30% de leur surface est imperméable et que la valeur de l'indice de pente global varie de 3 à 30 m/km. Le coefficient de ruissellement oscille de 20 à 40%. (Cahier OROSTM)

2.3.1 Expression de coefficient de ruissellement fréquentiel

En se référant à l'étude intitulée « Etude des crues à Madagascar » par Danloux, ORSTOM 1991, il apparaît que cette surface du bassin intervient dans le débit avec un indice exponentiel de 0,72. Ainsi, on détermine q^* le rapport entre les débits et les surfaces du bassin. Et les valeurs de q^* sont proportionnelles aux coefficients de ruissellement.⁵¹

$$q^* = \frac{Q}{S^{0,72}}$$

⁵¹ Bibliographie 5

L'exposant 0,72 résulte d'un ajustement pour les crues de période de retour.

| Station | Superficie [km ²] | Crue de fréquence 10 ans | Crue de fréquence 50 ans | Crue de fréquence 100 ans |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Ikopa à Ambohimanambola | 1311 | 1,16 | 1,61 | 1,80 |
| Ikopa à Anosizato | 1691 | 0,93 | 1,30 | 1,45 |
| Ikopa à Bevomanga | 4290 | 0,95 | 1,19 | 1,30 |
| Sisaony à Andramasina | 318 | 2,44 | 3,53 | 4,00 |
| Sisaony à Ampitatafika | 726 | 1,46 | 1,95 | 2,16 |
| Andromba à Behenjy | 321 | 1,91 | 2,36 | 2,54 |
| B.V supérieur de l'Ikopa | 4384 | 0,93 | 1,17 | 1,28 |

Tableau n°64 : Coefficient de ruissellement calculé à partir des débits de crues fréquentielles (q^*)

On remarque sur le tableau que, la valeur de q^* de l'Andromba à Behenjy et celle de la Sisaony à Andramasina sont un peu plus élevées. Ce qui peut être dû à la situation de ses bassins dans l'environ du massif de l'Ankaratra et à sa faible superficie.

Le rapport des valeurs de q^* , égal à celui des coefficients de ruissellements C, est :

| Période de retour | 10 ans | 50 ans | 100ans |
|---------------------|--------|--------|--------|
| C Ikopa / C Sisaony | 1,26 | 1,21 | 1,19 |

Source : bibliographie 5

Tableau n°65 : Rapport des valeurs de q^*

Remarque :

On peut rapprocher ces valeurs obtenues avec les formules usuelles donnant les coefficients de ruissellement en fonction de la végétation.

2.4 Formule d'évaluation

L'objectif de ce paragraphe est de mettre des formules d'évaluation des débits de crues de la zone considérée en vue d'estimer des débits de crues des bassins non jaugé.

Les formules d'évaluation utilisées dans la présente étude sont des formules empiriques, en l'occurrence les formules proposées par l'EEM, le SOGREAH⁵² et LOUIS DURET⁵³.

Les crues dépendent surtout de la surface des B.V. Mais entre autres, la forme, l'intensité et le volume des débits de crues dépendent essentiellement des paramètres tels que les temps caractéristiques, les perméabilités, ainsi que les caractéristiques physiques du bassin.

- E.E.M

$$Q=6,8*S^{0,8}$$

S : surface en [km²]

- SOGREAH

$$Q=11*S^{0,8}$$

S : surface en [km²]

- LOUIS DURET

$$Qt=0,025*S^{0,8}*Ig^{0,32}*P_h*\left(1-\frac{36}{P_h}\right)^2$$

S : surface en [km²]

I_g: Indice global de la pente

P_h : hauteur de pluie maximale journalière de période de retour T [mm]

Entre autre, cette formule peut être simplifiée comme ci-dessous ³:

$$Qt=0,002S^{0,8}I^{0,32}P_T^{1,39}$$

Q_t : Débit de crue de période de retour T (m³/s)

A : superficie du B.V (km²)

I : pente moyenne du bassin (m/km)

P_T : pluie maximale de 24h tombée en un point du B.V pour la même période de retour T (mm)

⁵² Bibliographie 8

⁵³ Bibliographie 11

³ Bibliographie 15

Comparaison des trois formules précédentes :

| Stations | EEM (m ³ /s) | SOGREA H (m ³ /s) | LOUIS DURET (m ³ /s) | | | | | |
|-----------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 10 | | 50 | | 100 | |
| | | | Q ₁ | Q ₂ | Q ₁ | Q ₂ | Q ₁ | Q ₂ |
| (1) | 2121,3 | 3431,4 | 996,8 | 1038,3 | 1301,8 | 1285,3 | 1414,5 | 1378,8 |
| (2) | 2600,3 | 4206,4 | 1221,9 | 1272,8 | 1595,8 | 1575,6 | 1733,9 | 1690,2 |
| (1') | 683,0 | 1104,9 | 390,9 | 407,2 | 510,5 | 504,0 | 554,7 | 540,7 |
| (3') | 1180,3 | 1909,3 | 675,4 | 703,6 | 882,1 | 870,9 | 958,4 | 934,3 |
| (1'') | 1322,1 | 2138,7 | 756,5 | 788,1 | 988,1 | 975,6 | 1073,6 | 1046,5 |
| (3) | 688,2 | 1113,3 | 433,7 | 451,7 | 566,4 | 559,2 | 615,4 | 599,9 |
| B.V total | 5476,1 | 8858,5 | 2568,0 | 2675,0 | 3353,9 | 3311,4 | 3644,2 | 3552,3 |

Tableau n°66 : Valeur des débits maximum de crue d'après les estimations par formules

Q1 : débit de crue d'après Louis DURET intégral

Q2 : débit de crue d'après Louis DURET simplifié

L'estimation obtenue par la formule EEM est plus compatible à une période de retour 25 ans.

Tandis que, la seconde formule est applicable à une période de retour plus de 100 ans. Par contre, ces deux formules précédentes présentent une imprécision sur le résultat.

D'après la formule de Louis DURET, l'estimation de la crue pour la période de retour 10 ans donne le résultat le plus satisfaisant. Par contre, pour les deux autres crues de période de retour 50 et 100 ans, il existe une incertitude de résultat⁵⁴.

Les lacs de retenue, les micro-dépressions réglables ont une influence importante sur les crues et ces paramètres n'ont pas été pris en compte dans les formules empiriques. Par conséquent, il peut apparaître une imprécision de calcul sur l'estimation des débits de crues. Les valeurs obtenues sont notamment surestimées.

3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL SUR LES CRUES

Il est reconnu que l'état de la couverture végétale et du degré d'érosion du B.V a une influence directe sur la violence et l'importance de crues. En effet, la déforestation excessive sur brûlis (pratique du tavy sur plusieurs régions de la zone étudiée) aggrave le risque de crues.

Néanmoins, la plaine d'Antananarivo, occupé par des dépressions marécageuses ou des rizières domine le bassin. Elle joue un rôle important dans la propagation et l'amortissement des crues. Par conséquent, il y a écrêttement de la plupart des crues dans la plaine.

L'augmentation moyenne de taux de reboisement défavorise notamment la violence de crue sur le bassin.

Chapitre VII : LES BASSES EAUX

Généralité

Les basses eaux sont dues à l'affaiblissement des pluies, qui correspond à la période de saison sèche où le débit du cours d'eau atteint sa valeur minimum dans l'année.

Dans ce chapitre, l'objectif principal vise à faire ressortir les caractéristiques d'étiage, la répartition spatiale des débits minima, les différents débits caractéristiques et différents coefficients.

1. ETUDE STATISTIQUE DES BASSES EAUX

L'étude statistique permet d'obtenir les valeurs fréquentielles des stations de l'Ikopa et celles des affluents. Les résultats de traitements relatifs sont portés aux tableaux mentionnés ci-après. Les détails de calcul sont contenus dans l'annexe n°11.

1.1 Ikopa

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------|-----|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 32,8 | 30,2 | 22,9 | 18,8 | 10,8 | 2,8 | - | - | - |
| | (2) | 13,8 | 13,3 | 12,0 | 11,3 | 9,8 | 8,4 | 7,6 | 6,3 | 5,8 |
| | (3) | 33,2 | 31,3 | 26,2 | 23,3 | 17,7 | 12,0 | 9,1 | 4,0 | 2,1 |

Tableau n°67 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GAUSS (Ikopa)

| Année Hydrologique | | humide | | | | médian | sèche | | | |
|--------------------------|-----|--------|------|------|------|--------|-------|-----|-----|-----|
| | | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 92,4 | 67,1 | 27,9 | 17,0 | 6,5 | 2,4 | 1,5 | 0,6 | 0,5 |
| | (2) | 13,9 | 13,3 | 11,8 | 11,0 | 9,7 | 8,5 | 8,0 | 7,1 | 6,8 |
| | (3) | 47,6 | 41,8 | 29,3 | 24,0 | 16,2 | 10,9 | 8,9 | 6,3 | 5,5 |

Tableau n°68 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GALTON (Ikopa)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian 2 | sèche | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|-------------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1) | 28,5 | 24,6 | 15,6 | 11,5 | 5,4 | 0,7 | - | - |
| | (2) | 13,0 | 12,4 | 10,7 | 10,0 | 8,9 | 8,1 | 7,7 | 7,2 |
| | (3) | 34,0 | 30,6 | 22,5 | 18,9 | 13,4 | 9,2 | 7,5 | 4,9 |

Tableau n°69 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GUMBEL (Ikopa)

1.2 Affluents de l'Ikopa : SISAONY et ANDROMBA

| Année Hydrologique | humide | | | | médian 2 | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-----|-----|-----|-------------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 2,0 | 1,9 | 1,5 | 1,3 | 1,0 | 0,6 | 0,4 | 0,1 |
| | (3') | 3,5 | 3,3 | 2,7 | 2,3 | 1,6 | 0,9 | 0,6 | - |
| | (1'') | 7,8 | 7,2 | 5,7 | 4,8 | 3,2 | 1,5 | 0,6 | - |

Tableau n°70 : Valeurs des débits d'étiage de fréquences différentes selon la loi de GAUSS (Sisaony et Andromba)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian 2 | sèche | | | |
|-----------------------|--------|------|------|-----|-------------|-------|-----|-----|-----|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 2,5 | 2,2 | 1,7 | 1,4 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| | (3') | 5,7 | 5,1 | 3,9 | 3,3 | 2,5 | 1,8 | 1,6 | 1,2 |
| | (1'') | 11,7 | 10,6 | 7,9 | 6,7 | 4,8 | 3,5 | 3,0 | 2,2 |

Tableau n°71 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GALTON (Sisaony et Andromba)

| Année Hydrologique | humide | | | | médian 2 | sèche | | | |
|-----------------------|--------|-----|-----|-----|-------------|-------|-----|-----|------|
| | 100 | 50 | 10 | 5 | | 5 | 10 | 50 | 100 |
| Q (m ³ /s) | (1') | 1,8 | 1,6 | 1,2 | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| | (3') | 3,7 | 3,2 | 2,2 | 1,8 | 1,1 | 0,6 | 0,4 | 0,03 |
| | (1'') | 7,1 | 6,3 | 4,3 | 3,4 | 2,0 | 1,0 | 0,6 | - |

Tableau n°72 : Valeurs des débits d'étiage (de fréquences différentes) selon la loi de GUMBEL (Sisaony et Andromba)

2. DEBITS CARACTERISTIQUES

Les débits caractéristiques sont dégagés de la courbe des débits classés, cette dernière est obtenue à partir du rangement par ordre décroissant des débits moyens journaliers qui sont numérotés de 1 à 365. A chaque rang fait correspondre à une fréquence déterminée par la formule ci-dessous. Donc, les débits moyens journaliers Q_i ont chacune une fréquence F_i . De ce fait, quelques exemples de valeurs des débits statistiques seront montrés dans les tableaux suivants. Mais les restes sont informés dans l'annexe n°11.

$$F = \frac{2n-1}{2N}$$

où,

n :rang des débits moyens journaliers

N :365

Les débits caractéristiques⁵⁵ suivants sont pris lors de l'année mentionnée avant le tableau.

- Pour la rivière Ikopa :

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| (1) | 15,3 | 16,7 | 18,7 | 21,3 | 26,6 | 43,6 | 78,8 |
| (2) | 14,2 | 15,7 | 17,0 | 18,9 | 27,3 | 56,2 | 84,5 |
| (3) | 17,9 | 20,5 | 29,7 | 40,0 | 84,2 | 176,0 | 247,0 |

Tableau n°73 : Débits caractéristiques de 1968/1969

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| (1) | 22,0 | 22,5 | 25,5 | 28,9 | 31,5 | 58,1 | 106,0 |
| (2) | 12,9 | 15,1 | 24,2 | 30,9 | 65,3 | 89,6 | 110,0 |
| (3) | 35,5 | 3737 | 42,4 | 52,3 | 152,0 | 302,0 | 366,0 |

Tableau n°74 : Débits caractéristiques de 1995/1996

⁵⁵ source : service de l'hydrologie

- Pour la rivière Sisaony :

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|-----|------|-----|-----|------|------|------|
| (1') | 1,6 | 1,8 | 2,2 | 3,1 | 5,6 | 17,2 | 41,9 |
| (3') | 2,6 | 2,8 | 3,6 | 4,5 | 14,0 | 34,8 | 51,0 |

Tableau n°75 : Débits caractéristiques de 1980/1981

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|-----|------|-----|-----|------|------|------|
| (1') | 1,2 | 1,4 | 2,2 | 2,9 | 4,9 | 14,4 | 29,8 |
| (3') | 1,2 | 2,4 | 3,7 | 4,6 | 14,2 | 58,0 | 98,0 |

Tableau n°76 : Débits caractéristiques de 1994/1995

- Pour la rivière Andromba :

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
| (1'') | 1,0 | 2,5 | 3,8 | 5,1 | 9,7 | 19,5 | 31,4 |

Tableau n°77 : Débits caractéristiques de 1968/1969

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|---------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
| (1'') | 1,3 | 1,9 | 2,8 | 3,5 | 6,6 | 15,5 | 24,1 |

Tableau n°78 : Débits caractéristiques de 1980/1981

| Station | DCE | DC11 | DC9 | DC6 | DC3 | DC1 | DCC |
|----------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| (1'') 94/95 | 4,3 | 5,8 | 9,0 | 13,2 | 18,3 | 38,1 | 60,2 |
| (1'') 95/96 | 5,8 | 9,1 | 11,4 | 13,9 | 21,6 | 50,2 | 80,3 |

Tableau n°79 : Débits caractéristiques de 1994 à 1996

- DCE : Débit caractéristique d'étiage [m^3/s]
- DC11 : Débit caractéristique de 11 mois [m^3/s]
- DC9 : Débit caractéristique de 9 mois [m^3/s]
- DC6 : Débit caractéristique de 6 mois [m^3/s]
- DC3 : Débit caractéristique de 3 mois [m^3/s]
- DC1 : Débit caractéristique de 1 mois [m^3/s]
- DCC : Débit caractéristique de crue [m^3/s]
-

3. REPARTITION SPATIALE DES DEBITS MINIMA

Dans ce paragraphe, on essaiera de mettre en évidence la cartographie des valeurs obtenues. Celles-ci incluent les lames écoulées inter annuelles, les débits journaliers minimaux spécifiques médian.

En l'absence de toute précipitation, le débit d'une rivière n'est plus entretenu que par la vidange des réserves accumulées dans le bassin lors de la saison de pluie précédente ; ces réserves sont localisées, d'une part, dans les nappes phréatiques et les réservoirs alluvionnaires bordant la vallée et d'autre part, dans les nappes généralisées du bassin.

Pendant la saison sèche, ces volumes restitués diminuent graduellement dans le temps, jusqu'à la première pluie : c'est le tarissement de la rivière. La valeur et la date d'apparition de l'étiage dépendent de l'abondance de la saison des pluies précédente, de la répartition spatiale et temporelle de ces pluies sur le bassin. Elles dépendent aussi de la loi de tarissement liée à l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin. Les pluies de saison sèche sont notamment loin d'être négligeable, avec leur distribution dans le temps et dans l'espace.

La vitesse de variation du débit d'étiage est régulièrement une cinétique, dont la constante α appelée « coefficient de tarissement » est caractéristique du bassin.

La vidange des aquifères, non réalimentés et drainés par le cours d'eau, obéit globalement et par approximation à une loi.

$$Q_{j\min} = Q_0 e^{-\alpha T}$$

où $Q_{j\min}$ est le débit journalier « charnière » correspondant au débit de base du début de vidange des réservoirs du bassin.

Et T est la durée de jour séparant l'observation des débits journaliers Q_0 et $Q_{j\min}$.

Ensuite, α le coefficient caractéristique de la loi de vidange du bassin. Théoriquement, ce coefficient devrait conserver sensiblement la même valeur d'une année à l'autre. Autrement dit ; les droites représentatives de la loi de tarissement sur un papier semi-logarithmique devraient être parallèle entre elles au fil des années, et décalées suivant l'état de remplissage des réserves souterraines en fin de saison de pluie. Mais en réalité, du fait que la répartition des réserves dans le

bassin est inégale. Puisque c'est en fonction de la distribution spatiale des précipitations et surtout de la fraction de pluies concourant à l'enrichissement des nappes phréatiques, le coefficient de tarissement varie au fil des années.

On peut avoir des différents coefficients correspondant à la vidange de la réserve, tels que :

- Le premier coefficient correspond au pseudo-tarissement, c'est la vidange progressive des réserves globaux du bassin en position haute de la nappe.

Généralement, ceci se produit en avril et juin de l'année.

- Le second coefficient correspond au tarissement, et c'est en juillet jusqu'en novembre.
- Et enfin, le troisième correspond à l'épuisement des réserves du bassin⁵⁶.

3.1 Répartition spatiale

En voici quelques valeurs de coefficient de tarissement et de l'estimation des réserves drainées tirées dans « Le fleuve et rivière de Madagascar » :

| Station | S [km ²] | H [mm] | q _{jmin} [l/s/km ²]] | q10 (décennale) | | R | α | T _c |
|---------|-------------------------|-----------|--|-----------------|-------|-----|----------|----------------|
| | | | | humide | sèche | | | |
| (3) | 4290 | 605 | 4 | 5,5 | 3,2 | 68 | 0,0059 | 117 |
| (1') | 318 | 595 | 3,2 | 4,9 | 2,2 | 120 | 0,0056 | 124 |

Tableau n°80 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents d'après « Le fleuve et rivière de Madagascar »

H : lame écoulée inter annuelle [mm]

α : coefficient de tarissement principal

q_{jmin} : débit journalier minimal spécifique médian [l/s/km²]

q10 : débits spécifiques décennales humides et sèches

R_d [m³/s] : estimation des réserves drainées en année moyenne

$$R_d = \left(\frac{Q_0 - Q_{jmin}}{\alpha * S} \right) * 86.4$$

Q₀ : débit journalier au début d'observation [m³/s]

⁵⁶ Bibliographie 2

$Q_{j\min}$: débit journalier minimal [m^3/s]

T_c : durée caractéristique de drainage correspond à la division par deux de débit de base [en jour].

$$T_c = \frac{\ln 2}{\alpha}$$

Les débits minimaux spécifiques, les débits spécifiques de récurrences décennales et les coefficients de tarissement principal sont montrés dans les tableaux n°83 à 85 ci-dessous. Ainsi l'estimation des réserves drainées en année moyenne et les durées caractéristiques de drainage que nous avons calculées pour les stations sont aussi exposées dans ces tableaux.

| Station | S [km ²] | H [mm] | Q [m ³ /s] | q _{jmin} [l/s/km ²] | q10 (décennale) | | R | α | T _c |
|---------|-------------------------|-----------|--------------------------|---|--------------------|-------|-----|----------|----------------|
| | | | | | humide | sèche | | | |
| (1) | 1311 | 714,4 | 10,8 | 8,2 | 17,5 | - | 208 | 0,0037 | 187 |
| (2) | 1691 | 593,0 | 9,8 | 5,8 | 7,2 | 4,5 | 229 | 0,0025 | 277 |
| (3) | 4290 | 567,5 | 17,7 | 4,1 | 6,1 | 2,1 | 101 | 0,0058 | 119 |
| (1') | 318 | 723,9 | 1,0 | 3,1 | 4,7 | 1,3 | 105 | 0,0052 | 134 |
| (3') | 726 | 543,0 | 1,6 | 2,2 | 3,7 | 0,8 | 101 | 0,0054 | 127 |
| (1'') | 321 | 1149,4 | 3,2 | 10,0 | 17,8 | 1,9 | 187 | 0,0050 | 138 |

Tableau n°81 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Gauss

| Station | S [km ²] | H [mm] | Q [m ³ /s] | q _{jmin} [l/s/km ²] | q10 (décennale) | | R | α | T _c |
|---------|-------------------------|-----------|--------------------------|---|--------------------|-------|-----|----------|----------------|
| | | | | | humide | sèche | | | |
| (1) | 1311 | 714,4 | 6,5 | 5,0 | 21,3 | 1,1 | 284 | 0,0037 | 187 |
| (2) | 1691 | 593,0 | 9,7 | 5,7 | 7,0 | 4,7 | 231 | 0,0025 | 277 |
| (3) | 4290 | 567,5 | 16,2 | 3,8 | 6,8 | 2,1 | 106 | 0,0058 | 119 |
| (1') | 318 | 723,9 | 2,0 | 6,3 | 8,2 | 4,7 | 100 | 0,0052 | 134 |
| (3') | 726 | 543,0 | 2,5 | 3,4 | 3,9 | 1,6 | 81 | 0,0054 | 127 |
| (1'') | 321 | 1149,4 | 4,8 | 15,0 | 24,6 | 9,3 | 102 | 0,0050 | 138 |

Tableau n°82 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Galton

| Station | S [km ²] | H [mm] | Q (m ³ /s) | q _{jmin} [l/s/km ²]] | q10 (décennale) | | R | α | T _c |
|---------|-------------------------|-----------|--------------------------|--|--------------------|-------|-----|----------|----------------|
| | | | | | humide | sèche | | | |
| (1) | 1311 | 714,4 | 5,4 | 4,1 | 11,9 | - | 303 | 0,0037 | 187 |
| (2) | 1691 | 593,0 | 8,9 | 5,3 | 6,3 | 4,6 | 247 | 0,0025 | 277 |
| (3) | 4290 | 567,5 | 13,4 | 3,1 | 5,2 | 1,7 | 116 | 0,0058 | 119 |
| (1') | 318 | 723,9 | 0,7 | 2,3 | 3,8 | 1,3 | 121 | 0,0052 | 134 |
| (3') | 726 | 543,0 | 1,1 | 1,5 | 3,0 | 0,6 | 111 | 0,0054 | 127 |
| (1'') | 321 | 1149,4 | 2,1 | 6,3 | 13,4 | 1,9 | 246 | 0,0050 | 138 |

Tableau n°83 : Répartition spatiale des débits d'étiages et quelques paramètres y afférents calculés d'après l'ajustement de la loi de Gumbel

Ainsi, les valeurs de débit décennal sèches de l'ajustement par la loi de Gauss et de Gumbel présentent un débit à sec. Par conséquent, pour des études de différents projets, il vaut mieux utiliser les valeurs de l'ajustement de la loi de Galton. Cette dernière montre toutes les valeurs des débits décennales sèches.

Les résultats des débits d'étiages d'Ambohimanambola pourraient être perturbés par l'influence du barrage d'Antelomita, sans compter les différents barrages d'aménagement hydroagricole. Dans ce cas, il y a lieu de prendre en compte ces paramètres sur l'influence pour avoir le naturel débit d'étiage.

3.2 Expression du débit spécifique minimal journalier en fonction de la lame écoulée:

Le débit journalier minimal spécifique peut être exprimé en fonction de la lame écoulée. Ensuite, un graphe de la figure n°17 a été établi afin de voir l'équation reliant le débit minimal spécifique et la lame écoulée. Et enfin, la relation trouvée est la suivante :

$$q_{jmin} = 0,0185 * H - 6,7 \quad \text{avec } R^2=0,9491$$

Apparemment, il y a une erreur qui apparaît dans cette relation et elle est de l'ordre de 11%.

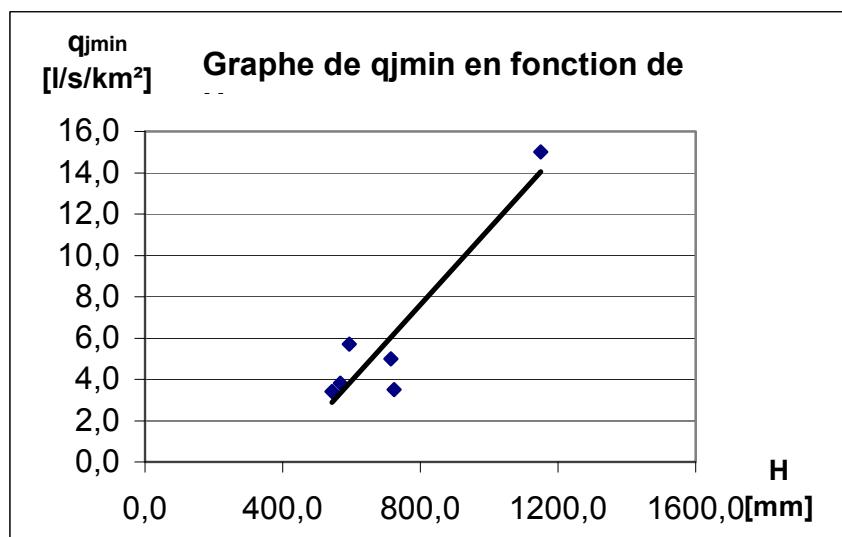


Figure n°17: Débit spécifique minimal journalier en fonction de la lame écoulée

4. RAPPORT DU DEBIT MINIMAL JOURNALIER AU MODULE

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier la valeur des rapports du débit spécifique d'étiage et de l'apport annuel, qui sera exprimée par q/Q .

| Station | q [l/s/km²] | Q [m³/s] | q/Q [%] |
|---------|---------------|------------|-----------|
| (1) | 5,0 | 29,70 | 0,17 |
| (2) | 5,7 | 31,80 | 0,17 |
| (3) | 3,8 | 77,20 | 0,05 |
| (1') | 3,5 | 7,30 | 0,48 |
| (3') | 3,4 | 12,50 | 0,27 |
| (1'') | 15 | 11,70 | 1,28 |

Tableau n°84 : Rapport du débit spécifique d'étiage et de l'apport annuel

Chapitre VIII : TRANSPORTS SOLIDES

Les transports solides sont des produits des divers types d'érosion. Des dépôts importants dans les sections de rivières endiguées pourraient à court terme réduire les sections de passage des crues et aboutir à des débordements.

D'une manière générale, on sait que les lits des rivières ont tendances à s'élever lorsqu'elles sont endiguées dans la plaine.

Les niveaux des crues s'élèvent progressivement au-dessus de la plaine. Cette évolution est d'autant plus rapide que les rivières sont chargées en sédiments, autant que les bassins sont peu boisés et érodés.

Des mesures des débits solides ont été effectuées sur les principales rivières : un débit solide égal à 260 g/m^3 dans l'Ikopa à Anosizato, un débit solide égal à 400 g/m^3 dans la Sisaony à Ampitatafika⁵⁷. D'après une étude faite par le BPPA, le niveau du taux de boisement et d'érosion influence nettement sur ce débit solide. Par conséquent, le débit solide de la Sisaony par m^3 excéder 53% de celui de l'Ikopa.

On a pu constater que pour un affluent de l'Ikopa, dont le bassin versant est peu boisé transportait une quantité importante de sable. Dans les autres affluents, les dépôts apparaissent beaucoup moins importants aux confluences.

Dans la Sisaony, on observe un basculement du fonds¹ :

- Exhaussement de 0,5 m en moyenne à l'amont d'Ambohidronono (situé à 6 km en amont du pont d'Ampitatafika).
- Creusement en aval, atteignant 2 m à l'amont du pont et compris entre 0,5 et 1 m à l'aval.

On peut expliquer cette évolution par trois phénomènes conjugués :

- Dépôts à l'amont pour augmenter la pente nécessaire à l'évacuation du débit solide provenant du bassin versant et qui a tendance à augmenter.
- A l'endroit du creusement le plus important par les prélèvements de sable, la rivière creuse à l'aval pour reconstituer son débit solide.

⁵⁷ Bibliographie 5

- A l'aval, enfin, la Sisaony devait initialement rejoindre l'Ikopa à Anosizato. Le confluent a du être repoussé à l'extrême de la plaine. La rivière a tendance à reconstituer sa pente initiale par creusement du fond.

Il ne semble pas en définitive qu'au droit de la ville et de la plaine d'Antananarivo il y ait actuellement un risque que les dépôts solides issus de l'érosion des bassins versants puissent combler en partie les portions endiguées, et aboutir à des débordements. Tout au contraire, les prélevements de sable, qui paraissent supérieurs aux apports, aboutissent à une stabilisation du lit ou à un surcreusement.

Il semble nécessaire, pour la protection des ouvrages, de contrôler cette évolution. A cet effet, des levés topographiques réguliers (profils en long et profils en travers tous les 100 m) devraient être entrepris lors de l'étiage des rivières; qui permettront de suivre l'évolution du niveau du lit. Par ailleurs, le contrôle des prélevements doit être assuré, et soumis à autorisation. Certaines portions du lit de la Sisaony devraient sans doute être dès à présent interdites à tout prélevement, afin de prévenir l'effet du sur creusement sur les ouvrages d'art.

Chapitre IX : GRANDES UNITES NATURELLES HYDROLOGIQUES

| | A/BOLA | A/ZATO | BEV | A/SINA | A/FOTS Y | A/FIKA | BEHE |
|---|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| Surface [km ²] | 1311 | 1691 | 4290 | 318 | 630 | 726 | 321 |
| Pluie annuelle P [mm] | 1359,5 | 1359,5 | 1359,5 | 1359,5 | 1359,5 | 1359,5 | 1359,5 |
| Evapotranspiration potentielle ETP [mm] | 1236 | 1236 | 1236 | 1236 | 1236 | 1236 | 1236 |
| Réserves facilement utilisable RFU [mm] | 471,5 | 471,5 | 471,5 | 471,5 | 471,5 | 471,5 | 471,5 |
| Evapotranspiration réelle ETR [mm] | 1438,3 | 1438,3 | 1438,3 | 1438,3 | 1438,3 | 1438,3 | 1438,3 |
| Lame annuelle H [mm] | 831,5 | | 628,4 | 617,9 | 647,6 | 645,2 | 1149,4 |
| Déficit d'écoulement D [mm] | 688,0 | | 848,3 | 780,3 | 749,5 | 748,0 | 245,8 |
| Coefficient d'écoulement Ke [%] | 0,51 | | 0,39 | 0,44 | 0,46 | 0,46 | 0,82 |
| Débit de crue [l/s/km ²] | 85,9 | 63,5 | 63,9 | 239,5 | - | 143,4 | 278,5 |
| Débit d'étiage [l/s/km ²] | 5,0 | 5,7 | 3,8 | 6,3 | 6,0 | 3,4 | 15,0 |
| Apport annuel [l/s/km ²] | 22,4 | | 17,3 | 19,5 | 20,5 | 20,5 | 36,4 |
| Coefficient de ruissellement C [%] | 31,3 | 30,3 | 27,0 | 37,2 | 33,6 | 37,2 | 26,9 |
| Irrégularité inter annuelle K3 | 2,30 | | 2,20 | 12,46 | 3,43 | 2,5 | 2,90 |

Tableau n°85 : Récapitulatif des grandes unités naturelles hydrologiques

Quelques valeurs de ce tableau seront cartographiées dans la figure n°18 de la page suivante en l'occurrence les lames annuelles, les débits minimaux spécifiques journaliers, les débits moyens spécifiques annuels, les débits spécifiques de crues.

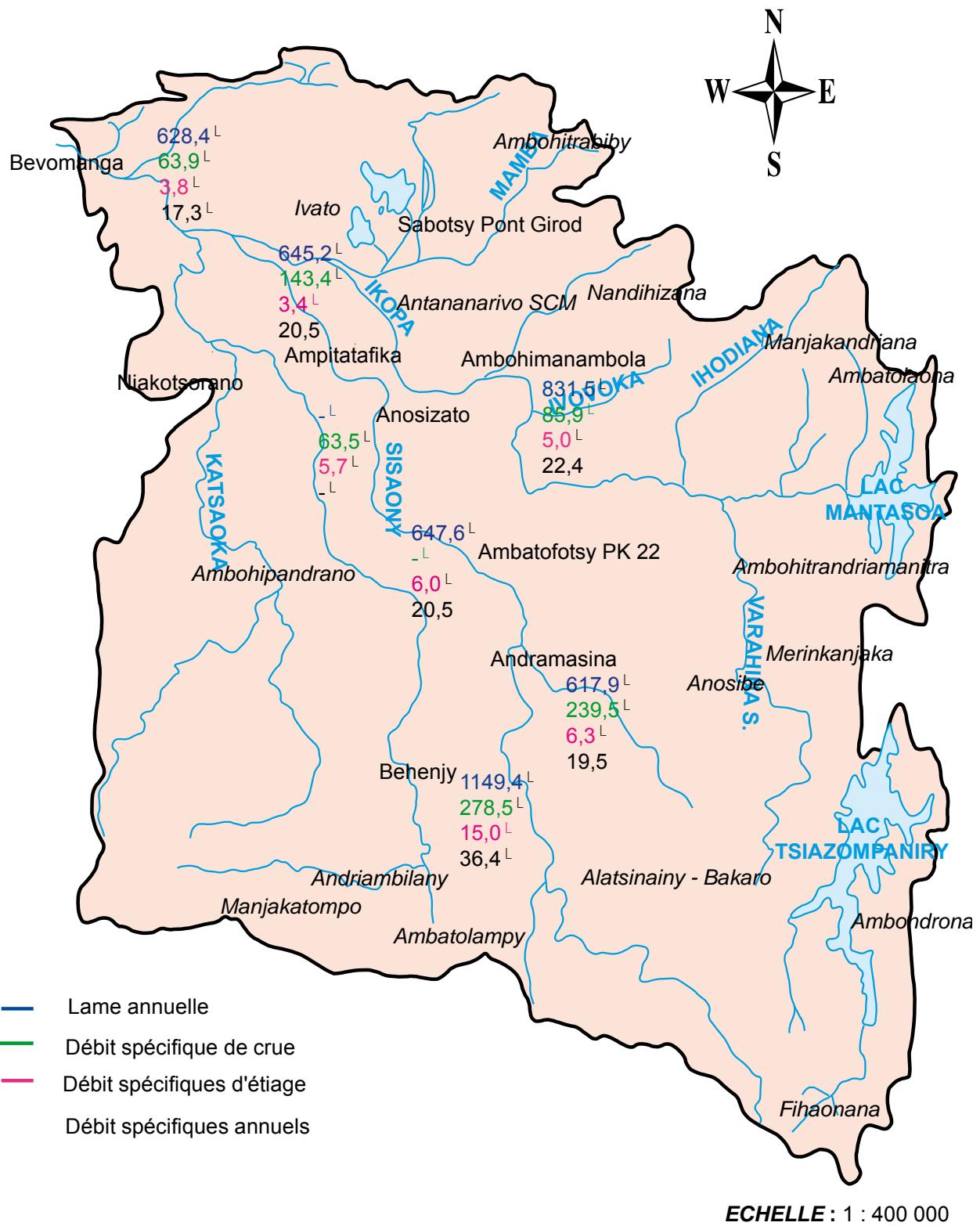


Figure n°18 : Répartition spatiales des caractéristiques du bassin

CONCLUSION

La présente étude réunit dans un premier temps, les facteurs conditionnels du régime, qui annonce l'état physique du B.V supérieur de l'Ikopa et les climats existants.

En effet, le contexte géologique du B.V montre que la totalité de la zone d'étude s'installe sur un socle métamorphique ou granitique du précambrien, à l'exception du massif d'Ankaratra. Ensuite, le bassin conserve toujours la topographie typique en collines arrondies et relief résiduel. Les grandes plaines qui sont progressivement remblayées, et la zone d'Ankaratra constituée des plateaux basaltiques de composition différente reste inchangé. Enfin, la presque totalité des sols appartient au domaine ferralitique à l'exception des sols alluviaux hydromorphes.

A part, la caractéristique de forme et l'hypsométrie permettent d'obtenir les différents paramètres physiques du bassin comme par exemple la densité du réseau hydrographique, l'indice global de la pente. Ce dernier est indispensable à l'estimation du débit de crue des bassins non jaugés.

Le réseau hydrographique est notamment composé de la rivière de l'Ikopa qui prend sa source au sud de Tsiaziompaniry contenant deux lacs : lac de Mantasoa et Tsiaziompaniry, et se termine à Farahantsana. Il compte au total une longueur de 172 km environ. La sisaony, l'Andromba sont les affluents de l'Ikopa s'écoulant dans sa rive gauche et les rejoignent juste en amont de Bevomanga. La Mamba est son affluent dans la rive droite.

L'état de la couverture végétale du B.V est modifiable en fonction des boisements et/ou dégradée à cause de la déforestation et de la consommation en bois. Actuellement, des reboisement récents et anciens occupent la presque totalité du partie nord-est. Un potentiel forestier occupe le sud-est. Le reste est voué par quelques surfaces boisées comme les rizicultures, les pâturages et cultures de tanety.

L'étude climatologique du lieu intéresse surtout la pluviométrie et l'évapotranspiration potentiel. D'abord, les régimes du vent restent inchangés mais ses vitesses seulement qui varient selon les saisons. Ensuite, la température tend à

augmenter de plus en plus, c'est à dire, elle est 18,8°C en moyenne durant 1961 à 1990 et devient 20,3°C dans les dernières décennies. Par contre, l'humidité relative diminue de 77 à 74. Après, l'évapotranspiration potentielle a été calculée en vue d'élaborer plus précisément les projets d'aménagement hydroagricole où les besoins en eau d'irrigation sont nécessaires. Elle varie selon les périodes de l'année : dans le bassin, elle est plus faible pendant la saison sèche, mais augmente pendant la saison de pluie. Et sa valeur moyenne annuel représente 90% des précipitations tandis que l'ETR correspond aux 2/3 des précipitations. Concernant ces derniers, ses apports constituent l'un des éléments essentiels dans l'écoulement. Autrement dit, la pluviométrie est l'un des principal facteurs du régime hydrologique. La pluie moyenne dans le bassin est de 1395,2 mm. Quant à la pluie maximale en 24 heures, elle est de 89,6 mm.

Dans la deuxième partie, l'analyse des données hydrologiques concerne les stations du bassin versant tel que Ambohimanambola, Bevomanga pour la rivière Ikopa ; Andramasina, Ambatofotsy, Ampitatafika pour Sisaony ; et seulement Behenjy pour l'Andromba. Pourtant, les données étant incomplètes, une procédure de complément a été faite soit par le calcul de $Q_{aval} = f(Q_{amont})$, soit par $Q = Q_0 e^{-\alpha t}$. Ainsi, des équipements hydrologiques sont nécessaires pour le prélèvement des données brutes des débits. Les appareils utilisés ne sont que la déversoir pour les stations à Antelomita et échelle limnimétrique pour le reste des stations de jaugeage. C'est à partir de ces données qu'on évaluera tous les régimes hydrologiques.

L'étude des apports annuels constituent l'évolution chronologique, les valeurs statistiques et l'évaluation. L'évolution chronologique des apports annuels est montrée par une courbe chronologique cumulée et qui a mis en évidence la phase cyclique des débits dans les bassins. Ses caractéristiques ont été calculées à partir des ajustements des lois de Gumbel, Galton et Gauss. Les résultats trouvés de ces ajustements évoluent par rapport aux études effectuées précédentes. Et ceux ci sont le mieux modérés par rapport aux autres résultats évalués à partir des formules. Quant aux bassins non jaugés, il vaut mieux faire intervenir des formules comme CTGREF, des méthodes analogues. Quelques valeurs régionalisées B, coefficient de répartition ont été reconstitués pour chaque stations. Ceux-ci sont bien adaptés à notre zone d'étude pour calculer les apports mensuels et annuels. En effet, les apports mensuels varient selon les saisons, soit 70% des débits annuels pendant la saison des pluies.

En second lieu, il y a les crues qui sont très important dans les régimes hydrologiques. Elles sont d'origine, soit d'un passage cyclonique, soit des ZCIT. Les crues de ces dernières années représentent un débit maximum de 563m³/s observé à Bevomanga en 1959. Quant aux valeurs statistiques, elles tournent aux environs de 76m³/s pour Andramasina et 274,1m³/s pour la station de Bevomanga. Les résultats de l'ajustement pourront être pris comme valeur de calage des projets. Néanmoins, l'évaluation des débits maximums de crues ont été réalisé pour comparer les résultats statistiques avec. Entre autre, les temps caractéristiques et les valeurs caractéristiques des crues sont montrés à une année hydrologique afin de voir les types valeurs instantanées. Le temps de base estimé pour l'Ikopa à Bevomanga est environ de 25jours, pour la Sisaony à Ampitatafika de 9jours. Ces valeurs sont tirées à partir de l'hydrogramme et comparées à l'estimation. Enfin, les coefficient de ruissellement du bassin sont tirés de la formule dans la Fleur et rivière de Madagascar varient en fonction de la surface. Le coefficient de ruissellement fréquentiel permet simplement d'apercevoir l'ordre de grandeur du coefficient de ruissellement.

Ensuite, les débits minima sont calculés statistiquement et répartis dans notre zone sous forme de débits spécifiques. Le coefficient de tarissement est calculé à partir de la loi de Darcy, où la valeurs de Q₀ est tirée de l'hydrogramme. Ce coefficient varie de 0,0037 pour l'IKopa à Ambohimanambola à 0,0058 pour celle Bevomanga. Ainsi, une relation entre la lame écoulée et le débit journalier minimal donnant l'équation suivant : $q_{j\min}=0,0185H-6,7$, avec un coefficient de régression $R^2=0,9491$, permet d'évaluer l'un des deux en absence de l'autre.

Enfin, les transports solides sont des produits de divers types de raisons. Par mesure des débits solides effectués de l'Ikopa à Anosizato, on trouve 260g/m³ contre 400g/m³ de Sisaony à Ampitatafika.

Pour en savoir plus sur l'hydrologie de notre zone d'étude, il est conseillé d'effectuer une étude approfondie.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie 1 : ALDEGUERHI : « *Monographie hydrologique du B.V supérieur de l'Ikopa* », édition de l'ORSTOM en 1967, ... pages.

Bibliographie 2 : ALDEGUERHI : « *Série hydrologique* », cahier OROSTOM, vol XXI, n°1,84 ; vol XIX n° 4,82.

Bibliographie 3 : ALPHONSE : « *Monographie hydrologique de quelque B.V : Le Sambirano à Ambanja* », Ministère de l'enseignement supérieur, Direction de la recherche scientifique, CNRT, département hydrologie, en 1982, 68 pages.

Bibliographie 4 : BCOM : « *Pluviométrie à Madagascar* » par la Direction de l'aménagement urbain et de l'habitat en 1967, 52 pages.

Bibliographie 5 : BDPA SCETAGRI, GERSAR BRL, DINIKA : « *Etude d'aménagement du B.V supérieur de l'Ikopa dominant la plaine d'Antananarivo* », hydrologie, par le bureau du projet de la plaine d'Antananarivo, en 1994, 25 pages.

Bibliographie 6 : BDPA SCETAGRI, GERSAR BRL, DINIKA : « *Etude d'aménagement du B.V supérieur de l'Ikopa dominant la plaine d'Antananarivo* », rapport de synthèse, par le bureau du projet de la plaine d'Antananarivo, en 1994, 73 pages.

Bibliographie 7 : J.L BONNENFANT et PELTIER. : « *hydraulique routière* »,

Bibliographie 8 : CAMUS : « *Monographie hydrologique du B.V supérieur de l'Ikopa* », en 1953.

Bibliographie 9 : Pierre CHAPERON , Joël DANLOUX, Luc FERRY : « *Fleuve et rivière de Madagascar* », édition de l'ORSTOM en 1993, 874 pages.

Bibliographie 10 : COULOMB C. : « *étude de la circulation de l'eau dans un sol argileux drainé* », thèse, univ. Paris en 1992, 245 pages.

Bibliographie 11 : Louis DURET: « estimation des débits de crue à Madagascar », édition copyright République malgache en 1976, 133 pages.

Bibliographie 12 : R.A GOMMES : « pocket computers in agrometeorology », FAO plant production and protection, 140 pages.

Bibliographie 13 : LAMBERT R. : « géographie du cycle de l'eau » Toulouse en 1996, 98 pages.

Bibliographie 15 : Jean Donné RASOLOFONIAINA : « Aménagement hydroagricole », 44 pages.

Bibliographie 16 : Gaston REMENIERAS: « L'hydrologie de l'Ingénieur », édition Eyrolles en 1986, 456 pages.

Bibliographie 17 : L. RIVIERE, P. LYAUDET, B. BLERVAQUE : « Etude de faisabilité de l'extension de crue de l'Ikopa à ses affluents (la Sisaony et l'Andromba), par le bureau du projet de la plaine d'Antananarivo en 1999, 46 pages.

Bibliographie 18 : : « instrument météorologique », éditionen,...,.....pages.

Bibliographie 19 : Jacques.beauchamp@sc.u-picardie.fr

LOGICIEL UTILISE

HYDROM : Traitement, de gestion et d'exploitation des données hydrologiques de la Banque Nationale des Données Hydrologiques de Madagascar

SAFARHY : Traitement des lois d'ajustement

EXCEL : Traitement des régressions linéaires.

MAPINFO : Traitement des images

ADOBE ILLUSTRATOR :Traitement des images

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| Remerciement | |
| Sommaire | |
| Liste des abréviations | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste des annexes | |
| Introduction | |
| Partie 1 : Facteurs conditionnels des régimes hydrologiques..... | 19 |
| Chapitre I. Facteurs géographiques..... | 19 |
| I.1 Situation et relief..... | 19 |
| I.1.1 Situations..... | 19 |
| I.1.1.1 Délimitation géographique..... | 19 |
| I.1.1.2 Délimitation administrative..... | 20 |
| I.1.2 Relief..... | 22 |
| I.1.2.1 Généralité..... | 22 |
| I.1.2.2 Caractéristique de forme..... | 24 |
| I.1.2.3 Hypsométrie..... | 25 |
| I.1.2.4 Influence sur l'écoulement..... | 25 |
| I.2 Aperçu géologique, géomorphologique..... | 27 |
| I.2.1 Caractéristique géologique et géomorphologique..... | 27 |
| I.2.1.1 Géologie..... | 27 |
| I.2.1.2 Géomorphologie..... | 29 |
| I.2.2 Influence sur l'écoulement..... | 30 |
| I.3 sols..... | 32 |
| I.3.1 Caractéristiques..... | 32 |
| I.3.1.1 Sol ferrallitique..... | 32 |
| I.3.1.2 Sol peu évolué..... | 32 |
| I.3.1.3 Sol hydromorphe..... | 32 |
| I.3.2 Influence sur l'écoulement..... | 33 |
| I.4 Couverture végétale..... | 35 |
| I.4.1 Caractéristiques..... | 35 |
| I.4.2 Influence sur l'écoulement..... | 36 |
| I.5 Réseau hydrographique..... | 36 |
| Chapitre II. Facteurs climatiques..... | 40 |
| II.1 Généralité sur le climat..... | 40 |
| II.2 Equipement du B.V au point de vue météorologique..... | 41 |
| II.3 Vents..... | 43 |
| II.3.1 Types des vents..... | 43 |
| II.3.1.1 Vents d'alizé..... | 43 |
| II.3.1.2 Vents de mousson..... | 43 |
| II.3.2 Caractères..... | 43 |
| II.3.2.1 Direction..... | 43 |
| II.3.2.2 Vitesse..... | 44 |
| II.3.2.3 Régime..... | 44 |
| II.4 Températures..... | 45 |
| II.4.1 Mesure de température..... | 45 |
| II.4.2 Valeurs caractéristiques des températures..... | 46 |

| | |
|--|----|
| II.4.2.1 Variation de température selon la latitude..... | 48 |
| II.4.2.2 Variation de température selon l'altitude..... | 49 |
| II.5 Humidité relative..... | 51 |
| II.5.1 Généralité et définition..... | 51 |
| II.5.2 Instrument de mesure..... | 51 |
| II.5.3 Calcul de l'humidité relative..... | 52 |
| II.6 Evaporation, transpiration, évapotranspiration..... | 53 |
| II.6.1 Evaporation..... | 53 |
| II.6.1.1 Définition..... | 53 |
| II.6.1.2 Instrument de mesure..... | 54 |
| II.6.2 Transpiration..... | 54 |
| II.6.2.1 Définition..... | 54 |
| II.6.2.2 Instrument de mesure..... | 55 |
| II.6.3 Evapotranspiration..... | 55 |
| II.6.3.1 Evapotranspiration potentielle..... | 55 |
| a Méthode de Thorntwaite..... | 55 |
| b Méthode de B.C..... | 56 |
| c Méthode de Penman..... | 56 |
| d Méthode de Turc..... | 56 |
| II.6.3.2 Déficit d'écoulement..... | 58 |
| a Définition..... | 58 |
| b Formule donnant le déficit d'écoulement en fonction des précipitations et des températures..... | 58 |
| b.1 selon Turc..... | 58 |
| b.2 selon Coutagne..... | 58 |
| II.7 Précipitations..... | 61 |
| II.7.1 Analyse pluviométrique mensuelle..... | 61 |
| II.7.2 caractéristiques pluviométrique annuelles..... | 65 |
| II.7.2.1 Répartition des pluies moyennes annuelles..... | 65 |
| II.7.2.2 Etude statistique des pluies moyennes annuelles..... | 65 |
| a Pluie moyenne annuelle..... | 67 |
| b Pluie maximum en 24 heures..... | 67 |
| II.8 Influence sur l'écoulement..... | 68 |
| Partie 2 : Analyse des données hydrologiques..... | 72 |
| Chapitre III. Présentation de l'analyse..... | 72 |
| III.1 Données disponible..... | 72 |
| III.2 Méthodologie de l'analyse..... | 73 |
| Chapitre IV. Généralité..... | 74 |
| IV.1 Equipement du B.V au point de vue hydrologique..... | 74 |
| IV.2 Jaugeage..... | 74 |
| IV.2.1 Station à échelle limnimétrique..... | 74 |
| IV.2.2 Station à deversoir..... | 74 |
| Partie 3 : Synthèse des régimes hydrologiques..... | 77 |
| Chapitre V. Apports annuels et leurs distributions mensuels..... | 77 |
| V.1 Apports annuels..... | 77 |
| V.1.1 Evolution des apports annuels..... | 77 |
| V.1.2 Caractéristiques des apports annuels..... | 79 |
| V.1.2.1 Résultats des études statistiques de l'Ikopa..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| V.1.2.2 Résultats des études statistiques des affluents de l'Ikopa..... | 81 |
| V.1.3 Organisation spatiale des apports annuels..... | 82 |
| V.1.4 Evaluation des apports annuels..... | 84 |
| V.1.4.1 Apports annuels d'après CTGREF..... | 84 |
| V.1.4.2 Apports annuels d'après les méthodes analogues..... | 86 |
| V.2 Distribution saisonnière..... | 88 |
| V.2.1 Coefficient de répartition..... | 88 |
| V.2.2 Résultats des apports mensuels de chaque station..... | 90 |
| V.2.2.1 Ikopa..... | 90 |
| V.2.2.2 Sisaony..... | 90 |
| V.2.2.2 Andromba..... | 91 |
| V.2.3 Représentation graphique des valeurs statistiques des apports mensuels..... | 91 |
| Chapitre VI. Crues..... | 93 |
| VI.1 Caractéristiques des crues..... | 93 |
| VI.1.1 Ikopa..... | 93 |
| VI.1.2 Affluents de l'Ikopa : Sisaony et Andromba..... | 95 |
| VI.2 Estimation des débits maximum de crues..... | 96 |
| VI.2.1 Temps caractéristiques..... | 96 |
| VI.2.1.1 Temps de concentration..... | 96 |
| VI.2.1.2 Temps de base..... | 97 |
| VI.2.2 Valeur caractéristique des crues..... | 97 |
| VI.2.3 Coefficient de ruissellement..... | 99 |
| VI.2.3.1 Expression de coefficient de ruissellement moyen..... | 100 |
| VI.2.3.2 Expression de coefficient de ruissellement fréquentiel..... | 100 |
| VI.2.4 Formule d'évaluation..... | 101 |
| VI.3 Impact environnementale sur les crues..... | 104 |
| Chapitre VII. Basses eaux..... | 105 |
| VII.1 Etudes statistiques des basses eaux..... | 105 |
| VII.1.1 Ikopa..... | 105 |
| VII.1.2 Affluents de l'Ikopa : Sisaony et Andromba..... | 106 |
| VII.2 Débits caractéristiques..... | 107 |
| VII.3 Répartition spatiale des débits minima..... | 109 |
| VI.3.1 Répartition spatiale..... | 110 |
| VI.3.2 Expression de débit spécifique minimal journalier en fonction de la lame écoulée..... | 112 |
| VII.4 Rapport du débit minimal journalier au module..... | 113 |
| Chapitre VIII. Transports solides..... | 114 |
| Chapitre IX. Grandes unités naturelles hydrologiques..... | 116 |

Conclusion

Références bibliographiques

Tables des matières.

Nom et prénom : ANDRIANANANTANY Nirianarinavalona

Titre : Monographie hydrologique du bassin versant supérieur de l'Ikopa

Pagination : 125

Nombre de figures : 18

Nombre de tableaux : 85

Nombre des annexes : 11

RESUME

La monographie hydrologique du bassin versant supérieur de l'Ikopa contient des renseignements inchangés et actualisés concernant les facteurs géographiques, climatologiques et hydrologiques du bassin.

L'insuffisance des données climatologiques, telles que l'évapotranspiration et la pluviométrie et des données hydrologiques, a représenté une difficulté. Malgré cela, on a pu élaborer les régimes hydrologiques du bassin en l'occurrence l'évapotranspiration, la pluie. Les différents débits des crues, les basses eaux et l'évolution chronologiques des apports annuels ont été étudiés sur différentes méthodes. Quelques valeurs et méthodes indispensables au bassin ont été notamment proposées.

Mots clés : Monographie, bassin versant, apport, crue, étiage, pluie, évapotranspiration, données, station, hydrologie, lois, ajustement, écoulement, débit.

Adresse de l'auteur : Logt 197 Cité Ambohipo Antananarivo 101.

Rapporteur : RAZAFINDRAKOTO Romuald Helison, Chef de Service de l'Hydrologie, Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie.

Encadreur : RAMANARIVO Solofofamampionona, enseignant chercheur à l' Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.