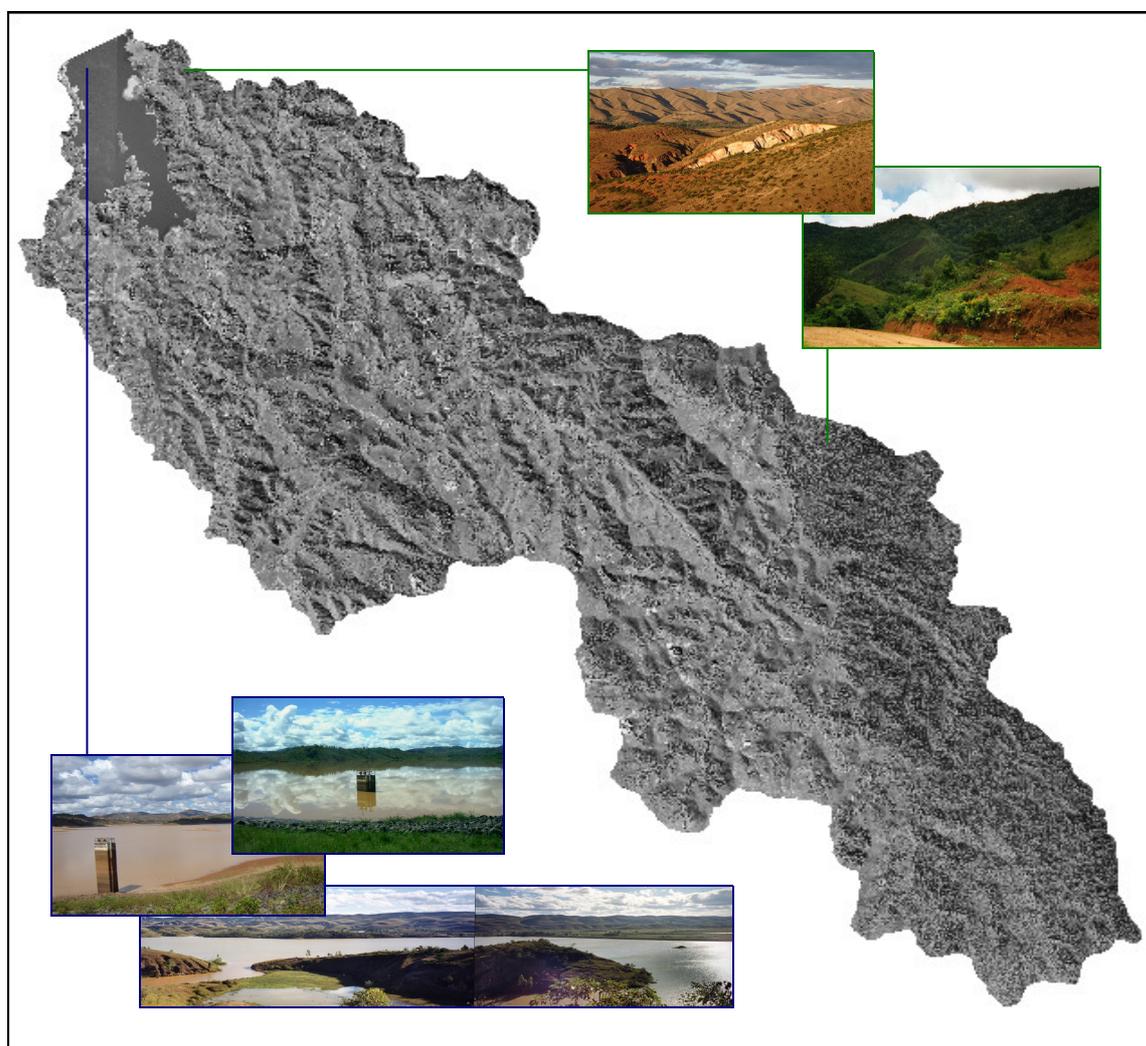


Université Jean Moulin - Lyon 3
Facultés des Lettres et Civilisations
CRGA - Centre de Recherche en Géographie et Aménagement - UMR 5600

Structure et fonctionnement du bassin versant de Bevava (Madagascar - Région du lac Alaotra)

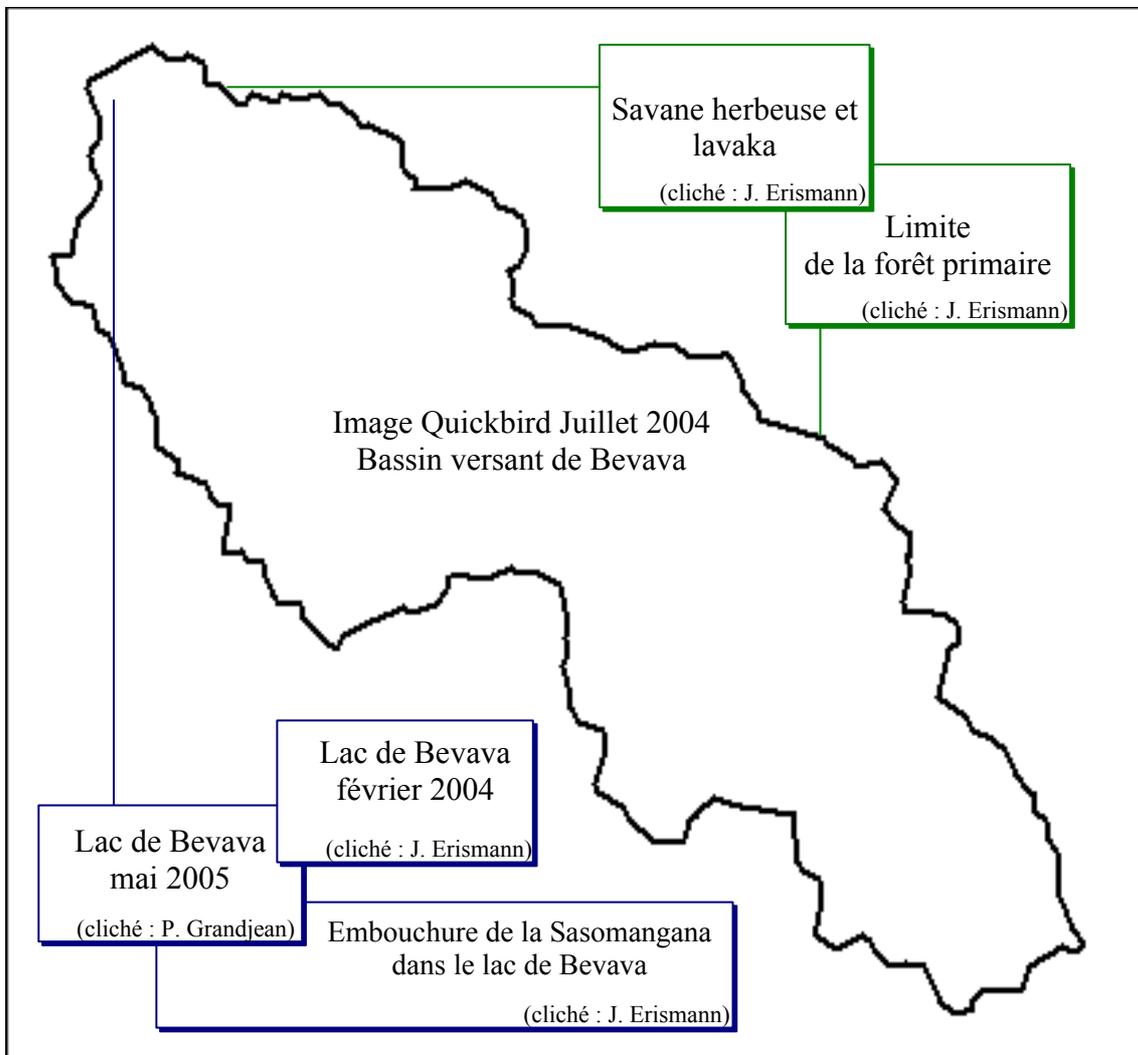
Julie ERISMANN



Mémoire de Master 1 de Géographie, Interface Nature - Société

Sous la direction de Michel MIETTON, professeur Lyon 3 J. Moulin

Juin 2006



Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu pour mener à bien cette étude.

Toute l'équipe du projet franco-malgache BVLac tout d'abord, qui nous a intégré très rapidement et nous a apporté un grand soutien logistique, humain et scientifique. Son directeur, M. P. Grandjean nous a fourni des données précieuses et, dès notre premier séjour, nous a permis de comprendre les problématiques liées à ce projet. M. J.P. Rafanomezana, technicien hydrologue B.R.L., nous a accompagné sur le terrain et nous a initié aux techniques hydrométriques tout comme M. Vallois, au niveau des SIG et du traitement des données GPS. Un grand merci aussi à M. Lanto Ravalitera, responsable du volet environnement du Projet, à Annick, la secrétaire du Projet, toujours disponible et souriante, aux chauffeurs et à notre interprète, Anjanahary Michella Razanakoto pour son aide sur le terrain.

L'Agence Française de Développement finance le projet, qui a pris en charge notre séjour.

D'autre part, je tiens à remercier chaleureusement M. M. Mietton, professeur à l'Université Lyon3 J. Moulin, qui m'a initié à la recherche par la recherche, tant dans une dimension fondamentale qu'appliquée et qui m'a permis de prendre part à un tel projet. Je le remercie également pour son implication, son suivi et son exigence dans ce travail.

Un grand merci également à Fanny Bonnier, pour son soutien de tous les jours, pour cette nouvelle amitié, et avec qui j'ai eu un grand plaisir à travailler.

Enfin mes remerciements s'adressent également à Emmanuel Grisorio qui nous a aidé lors de notre mission, par son expérience du terrain à Madagascar.

Je souhaite d'autre part remercier Georges Delfieu, mon bon papa, qui a passé une partie de sa vie en Afrique en tant qu'hydrologue et mon parrain Jean-Marc Delfieu, hydrologue lui aussi, qui m'ont transmis l'envie d'étudier cette chère ressource.

Sommaire

Introduction

Première partie : Structure du bassin versant et caractérisation du milieu

I. Caractéristiques morphométriques

II. Caractéristiques hydrographiques

III. Caractéristiques d'occupation du sol

IV. Caractéristiques géomorphologiques

V. Caractéristiques climatiques

Deuxième partie : Modalités de remplissage en eau et en sédiments du lac de Bevava

I. Un bilan hydrologique précis mais ponctuel dans le temps

II. Relation pluie-débit et typologie

III. Bathymétrie du lac, envasement et dégradation spécifique

Conclusion

Introduction

La région du lac Alaotra est considérée comme le premier grenier à riz de Madagascar avec plus de 80 000 ha de rizières. Cette activité, vitale pour les habitants et l'économie du pays, devient de plus en plus difficile à exercer notamment en raison d'une pression démographique forte (4,4 % de croissance annuelle) depuis trente ans, entraînant un manque croissant de terres arables. Cette région pourtant dynamique apparaît comme menacée d'une part par la stagnation de la production rizicole mais également par l'érosion et les coûts de maintenance des infrastructures hydrauliques.

Notre étude, menée en binôme avec Fanny Bonnier et dirigée par M. Mietton, s'inscrit dans un projet de gestion concertée des ressources qui est celui du projet BVLac à Ambatondrazaka, capitale de la région Alaotra.

Ce projet, financé par l'Agence Française de Développement (AFD) et dont le Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement (CIRAD) est le maître d'oeuvre, est composé de huit volets. Notre travail s'inscrit dans la partie « environnement et préservation des écosystèmes ». A terme, il s'agit de permettre aux acteurs locaux de continuer ces actions de développement et de protection dans une approche bassin versant voulu par le programme national malgache « Bassins Versants - Périmètres irrigués » du MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche).

De nombreuses études ont été conduites dans cette région vulnérable au plan des ressources hydriques et pédologiques mais un fait nouveau justifie d'entreprendre une nouvelle approche de la problématique du risque d'érosion (Mietton M., Rapport de mission « Erosion » à Ambatondrazaka auprès du projet BV Lac - CIRAD - AFD, novembre 2004), l'introduction par le projet BVLac et diverses ONG (Tafa par exemple) de nouvelles pratiques agro-écologiques (semis sur couvert végétal vivant ou mort) pouvant avoir des répercussions en terme d'hydrodynamique de surface.

Avant de tester ces nouvelles pratiques, il faut avoir un état de référence sur certaines unités hydrologiques. Le bassin versant de Bevava a été retenu comme objet d'étude car il fournit en eau le barrage de Bevava – Antanifotsy qui lui-même alimente 4000 ha de rizières dans la vallée Marianina au sud-est d'Ambatondrazaka (figure 1). Cette perspective de recherche appliquée est essentielle. Mais elle est - comme bien souvent - indissociable d'une perspective plus fondamentale. Comment apprécier la durée de vie du barrage, sinon en évaluant sa vitesse de remplissage en sédiments ? Le barrage est donc pour nous un indicateur du fonctionnement hydrologique du bassin versant. Les variations de niveau du lac nous renseignent sur le rendement hydrologique de cette unité fonctionnelle de 76 km² ; les apports de sédiments nous informent sur sa dégradation spécifique. Ce sont là les problématiques essentielles de ce premier travail de recherche, intitulé « Structure et fonctionnement du bassin versant de Bevava ». Les éléments de la structure (l.s.) étudiés correspondent aux caractères physiographiques, géomorphologiques (notamment sur la place des lavaka), climatiques principalement ; les états de surface ou modalités d'occupation des sols par les hommes ainsi que la gestion forestière étant étudiés par F. Bonnier. L'interprétation des images Quickbird de 2004 a été faite toutefois en commun et a conduit à une carte présentée dans les deux mémoires. En résumé, nos travaux sont tournés vers l'amont du barrage ; d'autres problématiques viendront ultérieurement se greffer quant à la gestion hydraulique en aval.

Cette étude a été réalisée d'abord grâce à une reconnaissance de terrain lors de deux séjours, l'un de courte durée (deux semaines en février 2005), apparu nécessaire pour apprécier le fonctionnement de ce milieu durant la saison des pluies¹ à pied, l'autre de deux mois et demi (8 juin -15 août 2005), M. Mietton nous ayant rejoint sur le terrain durant la semaine du 22 juin.

Par ailleurs, ce travail a supposé le traitement de diverses données :

- « données-images », sous forme de scènes Quickbird de haute résolution (2004), acquises par le projet BVLac, et photographies aériennes (1992) interprétées en stéréoscopie et confrontées à la vérité terrain.

- données pluviométriques, fournies par un partenaire du Projet, BRL², permettant de suivre les pluies journalières sur quatre stations du bassin : Bevava et Betatamo en aval, Antsevabe et Sahatelo en amont, où sont couplés, depuis le début de la campagne 1999-2000, pluviographes électromécaniques et simples pluviomètres.

A ces données récoltées, mises en forme, traitées et interprétées aboutissant à des relations pluies-débits ou des bilans hydrologiques partiels, s'ajoutent des données produites par echosondage lors de la mission de M. Mietton, durant la semaine du 22 juin 2005, au début de notre séjour, permettant une bonne appréciation de l'envasement du lac de retenue.

¹ De ce point de vue, il nous a été donné l'occasion « d'apprécier » les pluies diluviennes (65 mm dans la soirée du 4 mars) et inondations de la région durant ce mois (une rupture de digue s'est d'ailleurs produite au moment de notre départ).

² Bas Rhône Languedoc

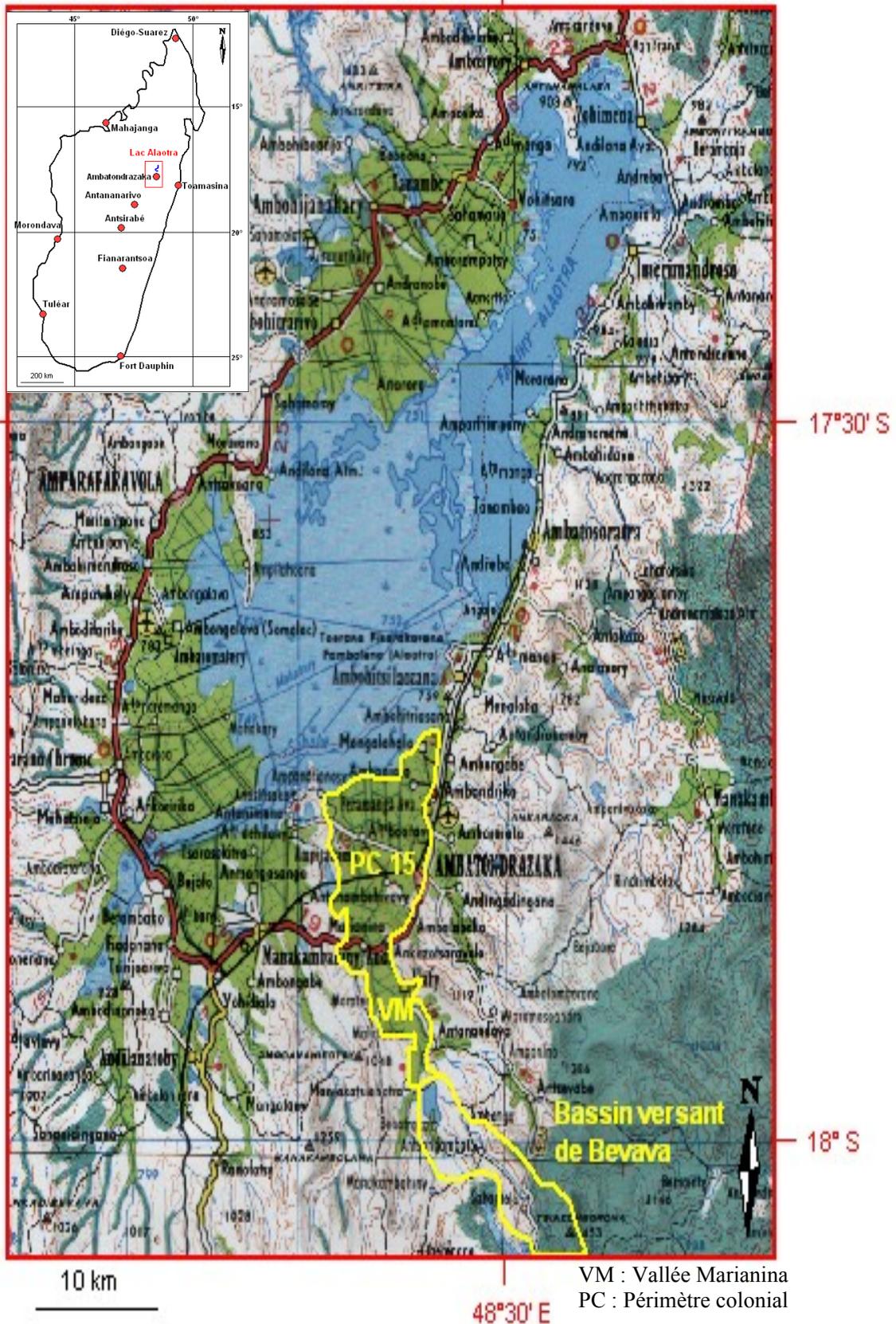


Figure 1 : Situation géographique de la zone étudiée

Partie 1
Structure du bassin versant et caractérisation du milieu

L'alimentation en eau des rizières entourant le lac Alaotra est en partie contrôlée par quatre barrages sur quelques-unes des rivières principales alimentant la région : au Nord, sur la Sahamaloto et l'Anony, et au Sud, sur la Sahabe et la Sasomangana. Ce bassin de la Sasomangana constitue l'un des amonts de la vallée Marianina ; d'autres rivières n'étant pas contrôlées : la Lohafasika et l'Harave (figure 13, p.28).

Le barrage-digue de Bevava, long de 750 m, a été construit en 1959 afin de créer une réserve en eau suffisante pour soutenir l'activité rizicole. A l'ouest de ce lac a également été aménagé un évacuateur de crue correspondant à un seuil en béton de 40m. de large sur un lac annexe relié à la retenue par un chenal de 200m de longueur environ. Il déverse dans la rivière voisine, la Lohafasika, à partir de la côte 820,02 NGM (Normes Géographiques Malgaches). Une carte de 1913, retrouvée récemment, montre déjà la présence à cette date d'un lac naturel sur le site du lac de retenue.

I - CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES

Ces caractéristiques sont tributaires du tracé des limites du bassin versant. Cette limite a été définie à la fois grâce aux images Quickbird mais également par interprétation stéréoscopique des prises de vue aériennes de 1992, lorsque nous étions sur le terrain.

A noter que ce réseau est immature, peu organisé, avec une ligne de partage des eaux principale, entre les versants oriental et occidental, ténue, ce qui avait d'ailleurs donné naissance à un projet d'aménagement³.

- Ce bassin versant est de taille moyenne : 76 km². Son périmètre (P) est de 54 km.
- Le coefficient de compacité ou de Gravelius (K_c)⁴ est de 1,76, valeur élevée, qui traduit une forme très allongée de ce bassin versant, probablement à mettre en rapport avec la structure géologique d'un socle précambrien, composé de migmatites granitoïdes, dont l'orientation SE-NO est visible⁵ sur les images Quickbird et coïncide quasiment avec l'orientation du réseau hydrographique principal.

Ce paramètre de forme a son importance en termes hydrologiques puisqu'il peut rendre compte, toutes choses égales par ailleurs, de réponses d'écoulement différées et de pics de crues relativement limitées.

- Les dimensions du rectangle équivalent sont de 23,7 km de longueur et de 3,2 km de largeur.

- L'altitude maximale est de 1463m. (mont Tsiazomborona) en amont, au coeur de la forêt primaire et l'altitude minimale est de 820m (figure 3).

L'altitude moyenne⁶ est de 992m

L'altitude médiane du bassin, lue sur la courbe hypsométrique (point de fréquence 50%), est de 950 m.

³ Le projet d'aménagement avait pour objectif de faire transiter par des pompes l'eau des marais de Didy, au sud-est du bassin versant, vers le bassin de Bevava, afin d'augmenter la capacité en eau du lac de retenue. A peine inauguré, ce projet fut stoppé par le manque d'approvisionnement en fioul pour faire marcher les pompes !

⁴ $K_c = 0,282.P.S^{-1/2}$

⁵ Cette orientation est encore plus nette mais méridienne dans la partie située à l'ouest du bassin

⁶ L'altitude moyenne est donnée par la formule $H_{moy} = \sum((A_i.h_i)/S)$ dans laquelle A_i est la surface comprise entre deux courbes de niveau voisines (km²) et h_i l'altitude moyenne entre ces deux courbes de niveau (m.)

- La courbe hypsométrique du bassin versant a été établie en numérisant toutes les courbes de niveau avec le logiciel Mapinfo à partir d'un MNT établi par E. Grisorio lors d'une mission à Madagascar, avant notre séjour. L'équidistance entre deux courbes de niveau est de 25m de 850m à 1200m puis de 50m jusqu'à 1400m. (figure 2, 3 et 4)
- L'indice global de pente (I_g)⁷ est de 18,9 ‰ (m/km). L'indice de pente⁸ est de 43,9.

Enfin, les pentes peuvent être classées comme suit :

Classes de pentes	0 - 12 %	12 - 40 %	> 40 %
% en superficie	42,36 %	37,75 %	20,56 %

Source : BRL 2000

Tableau 1 : Répartition surfacique des classes de pente sur le bassin de Bevava

⁷ $I_g = D/L$, correspond au rapport entre la dénivelée séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin (déterminées par la courbe hypsométrique) et la longueur du rectangle équivalent

⁸ $I_p = 1/(\sqrt{L}) \cdot \sum \sqrt{f_i \cdot d_i}$. L est la longueur du rectangle équivalent (m.), f_i représente la fréquence en % de la surface comprises entre les courbes de niveau voisines cotées c_i et c_{i-1} , d_i la dénivelée entre les deux courbes de niveau voisines cotées c_i et c_{i-1}

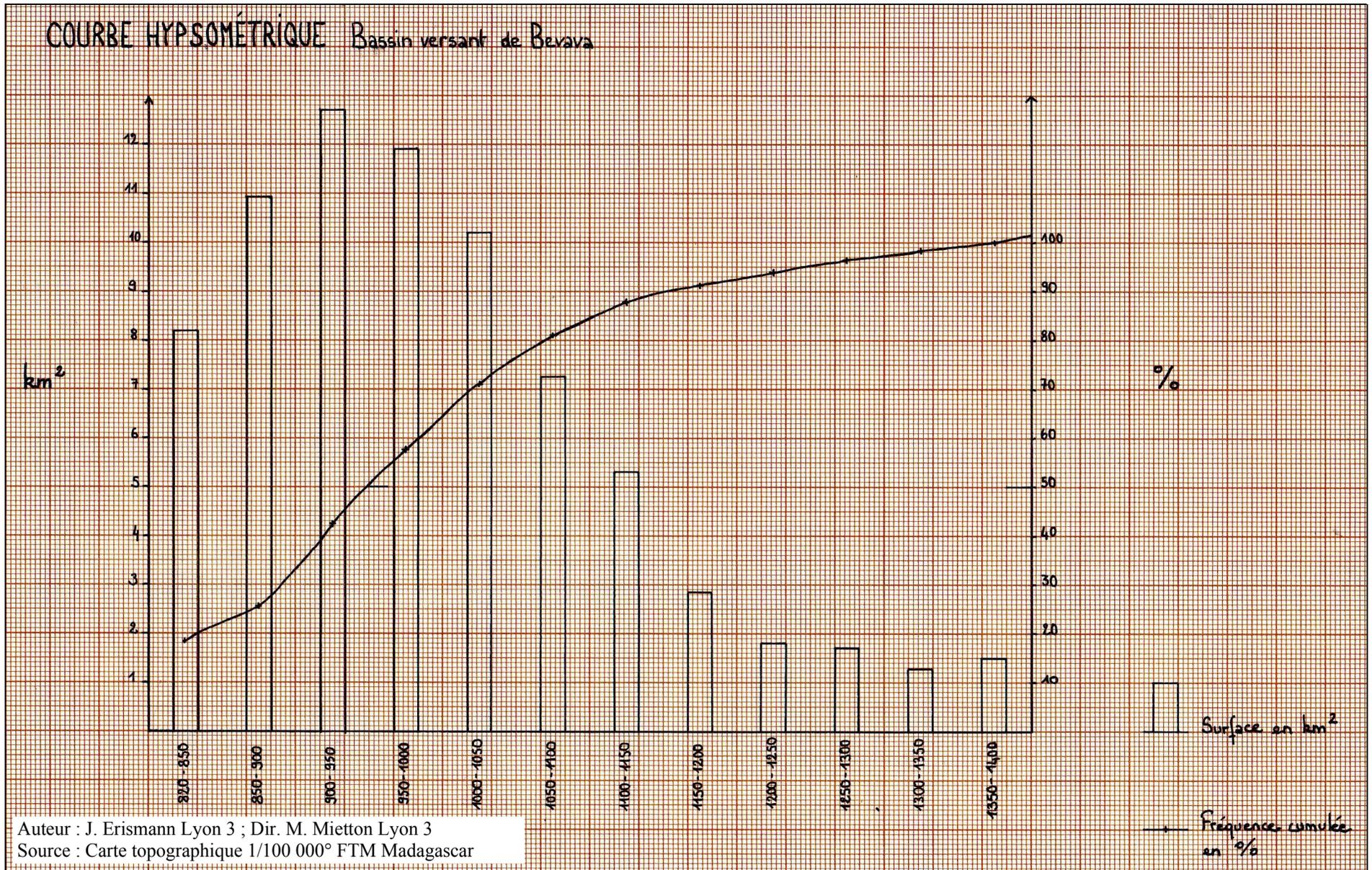


Figure 2 : Courbe hypsonétrique du bassin versant de Bevava

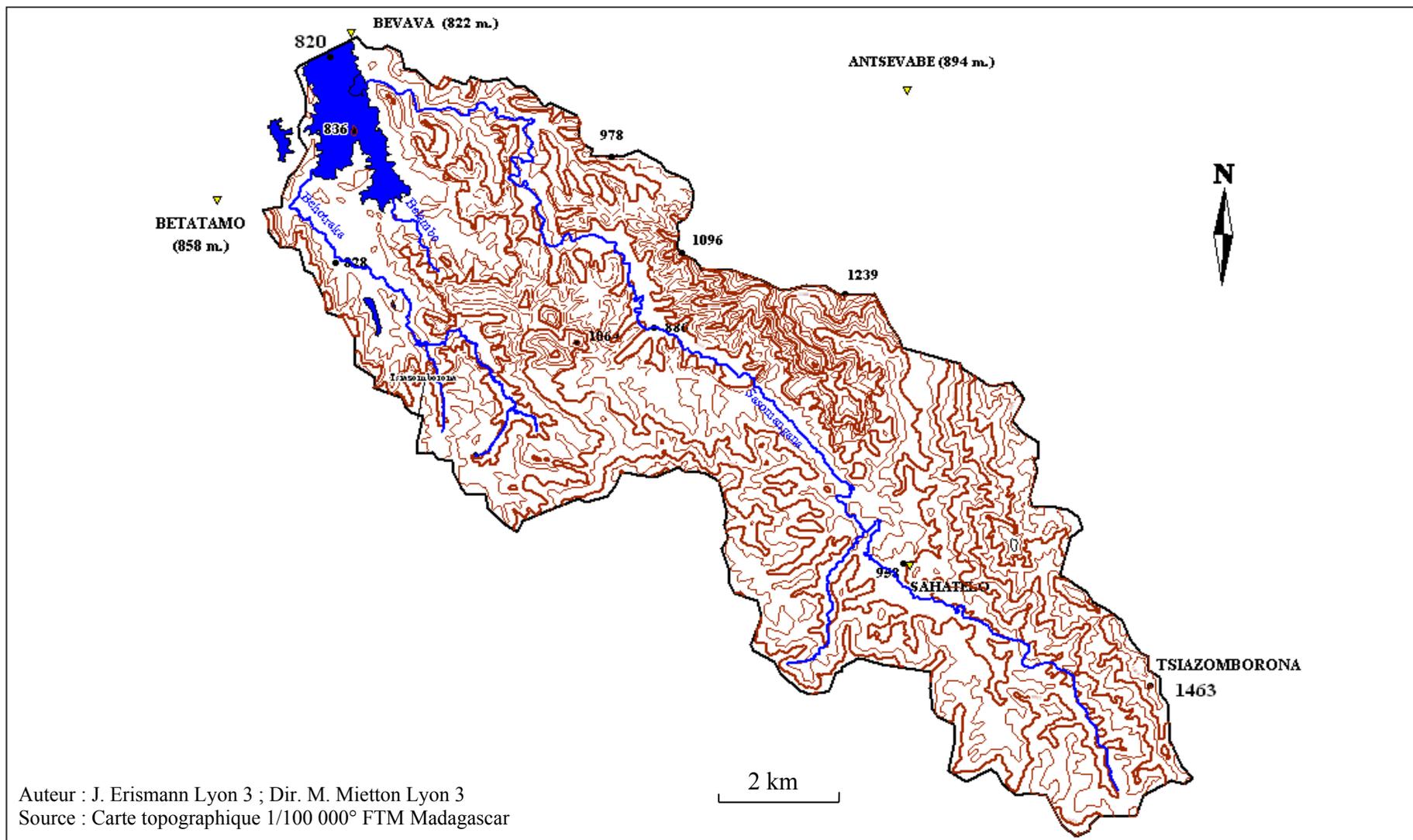


Figure 3 : Le relief du bassin versant de Bevava

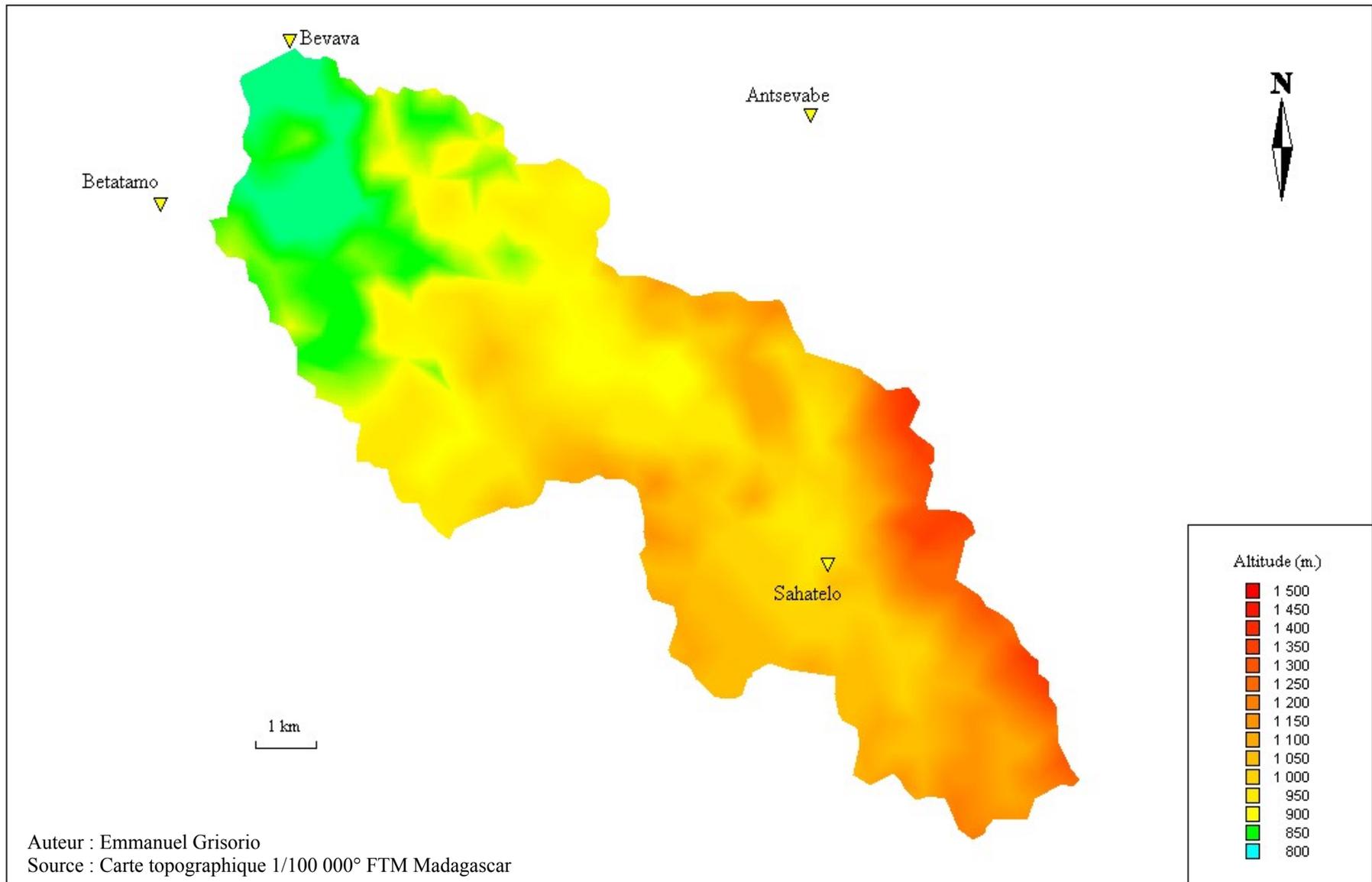


Figure 4 : Modèle numérique de terrain du bassin versant de Bevava

II - CARACTÉRISTIQUES HYDROGRAPHIQUES

- Ce bassin versant est composé de trois sous-bassins : de la Sasomangana (56,5 km²), de la Behotraka (13,3 km²) et de la Belambo (4,2 km²), auxquels il faut rajouter la surface du lac de retenue d'environ 2 km². Pour la classification des cours d'eau, la méthode de Schumm - Strahler (1957)⁹ a été utilisée.

La rivière principale qui draine ce bassin versant est la Sasomangana. Prenant sa source dans la forêt primaire en un point difficile à repérer sur photo aérienne ou sur le terrain, sa longueur est d'environ 22 km. Son profil longitudinal est présenté sur la figure 6 ci-dessous. Il est assez régulier avec toutefois en amont (partie dans la forêt primaire) les pentes les plus fortes : on a un dénivelé de 353m. en un kilomètre seulement à partir de l'altitude maximale au mont Tsiazomborona.

Une rupture de pente marquée apparaît à 11 km de la source : en moins de 100m on passe de la côte 925 à 900m. Elle se situe au bout d'une vallée rectiligne d'environ 2 km de long sur 100 m. de large. Elle peut cependant être nuancée car elle se trouve à la limite entre les deux cartes topographiques (1/100 000°) ayant servi à établir le MNT avec le logiciel Surfer (méthode d'interpolation par krigeage). L'équidistance des courbes dans la partie nord est de 25m. alors que dans la partie sud elle est de 50m.

- Le degré de développement du réseau peut être précisé par la densité de drainage (Dd, introduite par Horton)¹⁰. La longueur totale du réseau hydrographique (ordres confondus) étant de 115,2 km, on a $Dd=1,5 \text{ km/km}^2$.

La plupart des cours d'eau sont d'ordre 1 (48,8 %), 26,7 % d'ordre 2, près de 20 % d'ordre 3 et enfin 4,1 % d'ordre 4, ce dernier étant uniquement présent dans le sous bassin de la Behotraka.

-Le rapport de confluence (Rc)¹¹ entre les portions du réseau d'ordre 1 et 2 est de 4,5.

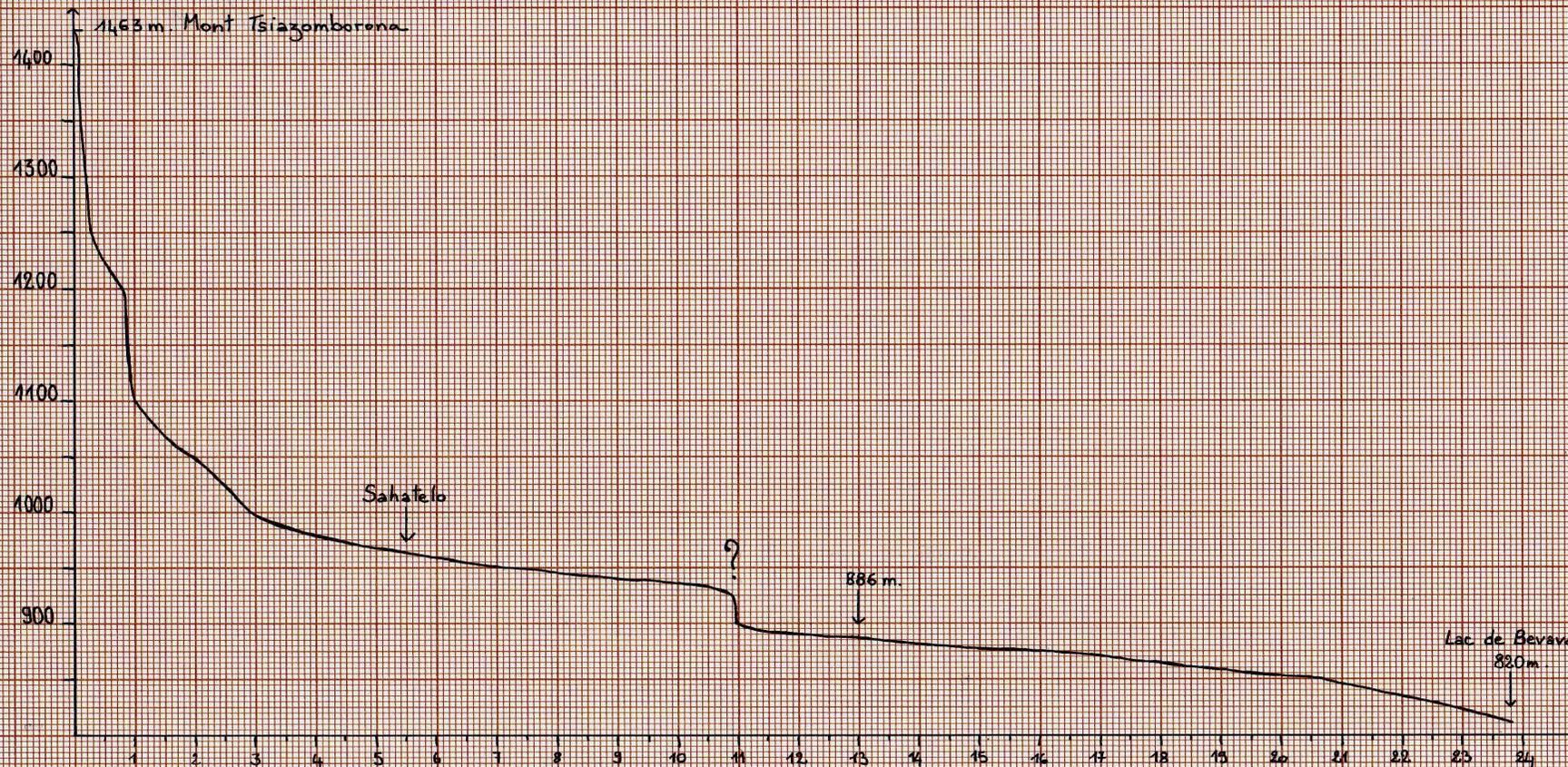
⁹ On rappellera que cette classification est construite sur les principes suivants : tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre 1, la réunion de deux cours d'eau d'ordre x donne naissance à un tronçon d'ordre x+1 et enfin la réunion de deux tronçons d'ordre différent donne la valeur la plus élevée à partir du confluent.

¹⁰ $Dd = (\sum Lx)/S$, le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la superficie du bassin versant.

¹¹ $Rc = N_x/N_{(x+1)}$, correspond au rapport entre le nombre de cours d'eau d'ordre x et (x+1).

PROFIL LONGITUDINAL Bassin versant de Bevava - Rivière Sasomangana

Altitude (m.)



Auteur : J. Erismann Lyon 3 ; Dir. M. Mietton Lyon 3
Source : Carte topographique 1/100 000° CIRAD - Madagascar

Distance (km.)

Figure 5 : Profil longitudinal de la rivière Sasomangana

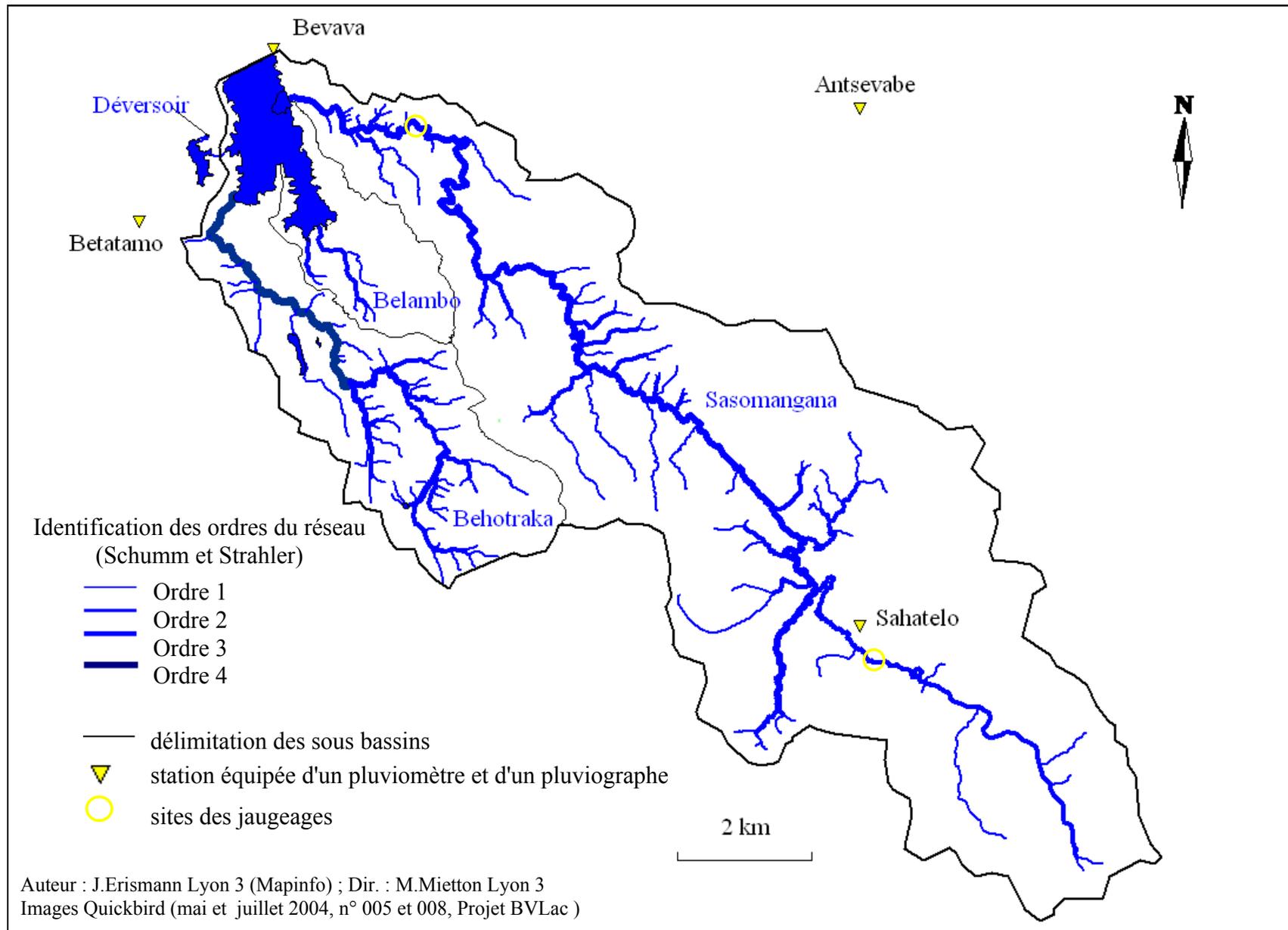


Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin versant de Bevava

III – CARACTÉRISTIQUES DE COUVERTURE VÉGÉTALE

Les caractéristiques d'occupation du sol sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	% de la surface totale	superficie (km ²)
Lacs	2,8	2,2
Iles	0,03	0,02
Villages	0,1	0,08
Rizières	3,9	3
Autres cultures	1,7	1,3
Lavaka	5	3,9
Sols nus ou dégradés	1,6	1,2
Forêt primaire	23	17,9
Lambeaux forêt primaire	5,4	4,2
Boisements denses	3	2,3
Boisements clairsemés	11	8,3
Savane herbeuse	42,5	33,1
Total	100	77,5

Tableau 2 : Occupation du sol du bassin versant de Bevava

Le bassin versant de Bevava se distingue nettement du paysage alentour par une présence arbustive et arborée beaucoup plus marquée : ceci s'explique en partie par les campagnes de boisement qui ont été conduites par la CIREF (Circonscription des Eaux et Forêts) depuis les années 60, à l'achèvement de la construction du barrage. Toutefois cela ne représente que 10,6 km², soit 14% de l'ensemble du bassin.

On trouve principalement deux variétés différentes d'Eucalyptus, des Acacias (*Acacia auriculiformis*, *Acacia dealbata*) et deux espèces de Grevillea (*Grevillea banksii* et *Grevillea robusta*)¹².

Ce bassin versant est en outre remarquable par la présence de la forêt primaire en amont du bassin versant, se présentant sous la forme d'un véritable front forestier à l'est de la route Sahatelo-Didy ou sous forme de lambeaux plus en aval, essentiellement dans l'axe des principaux bas-fonds. Ce type de végétation représente 28,4 % de la superficie totale du bassin versant, soit 22,1 km².

Au total, toutes espèces confondues, la présence de la végétation arborée et arbustive représente plus d'un tiers du bassin (42,4%, soit une superficie de 32,7 km²).

Toutefois, on ne peut pas affirmer que nous nous trouvons ici dans un ensemble à prédominance forestière car la plupart de ces espaces (hormis bien évidemment le bloc forestier en amont) sont représentés par des boisements clairsemés¹³ (78% des espaces boisés).

La savane herbeuse totalise quant à elle 42,5 % de la superficie totale de ce bassin versant soit 33,1 km². Cette savane est composée principalement d'*Aristida sp.*, cespiteuse en touffes peu couvrantes, qui est la dernière herbacée que l'on trouve avant dégradation totale du sol (R. Pernet, 1953).

¹² Les recherches prochaines permettront de donner un inventaire plus précis des espèces présentes sur le bassin versant

¹³ On considère comme boisements clairsemés les espaces où les arbres et arbustes ne totalisent au maximum qu'un tiers environ de la zone considérée.

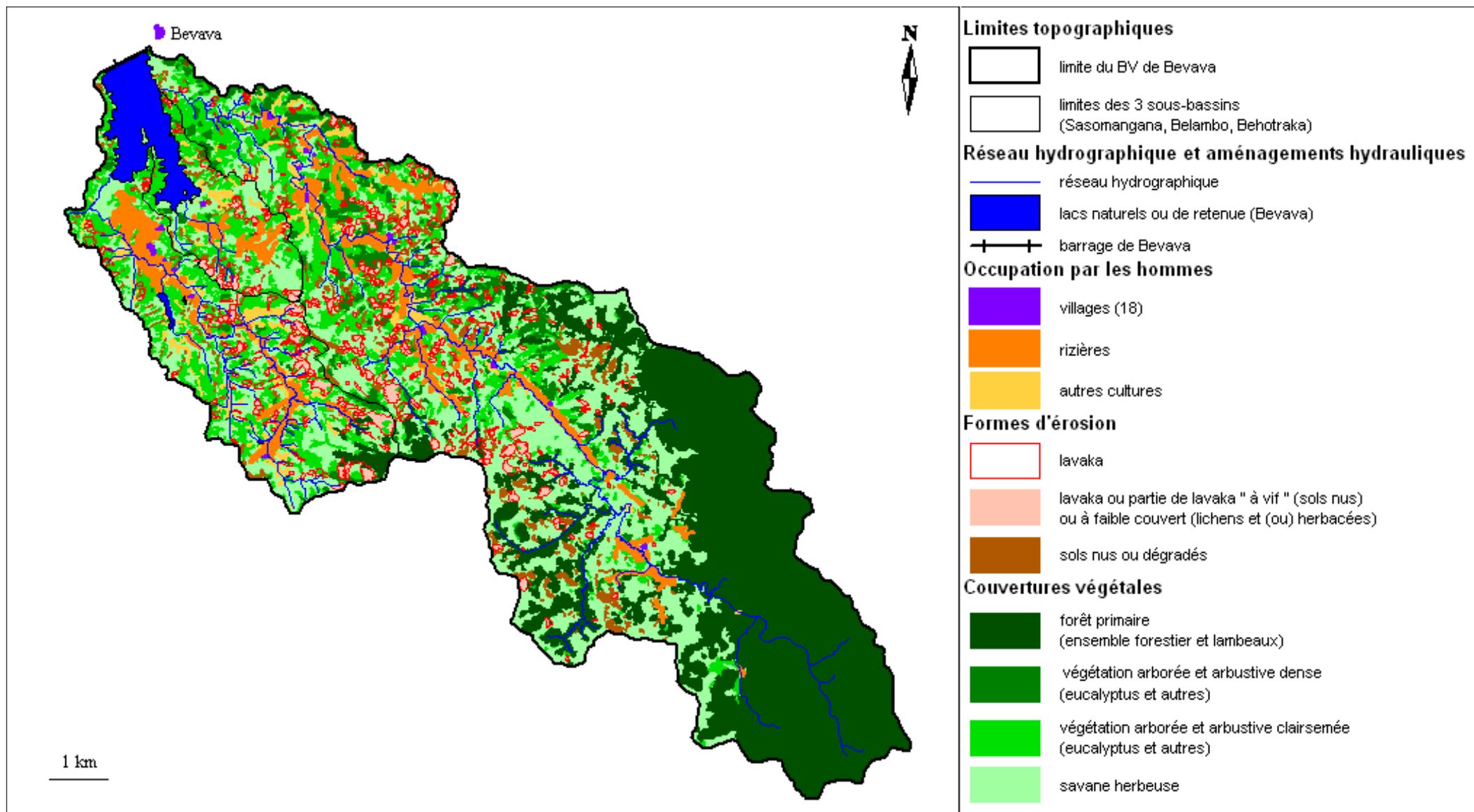


Figure 7 : Occupation du sol du bassin versant de Bevava en 2004

L'occupation du bassin par l'homme a débuté dans les années 60. On trouve aujourd'hui 18 villages dans notre zone d'étude. Ils se situent tous à proximité immédiate du réseau hydrographique (11 au bord de la Sasomangana, 6 le long de la Behotraka et le dernier tout à fait au sud du lac à proximité de la Belambo). Les espaces cultivés représentent 5,6% du bassin (4,3 km²) ; 70% de ceux-ci sont des rizières, situées dans les bas-fonds ou en terrasses de bas de pente. Les autres cultures sont principalement la canne à sucre, le manioc, la patate douce, et divers autres légumes. Il faut souligner que lors des enquêtes menées avec F. Bonnier, tous les habitants nous ont fait part du manque de terres arables.

Une partie des habitants possède également des zébus qu'ils font pâturer sur les lignes de crête. Ces chemins préférentiels sont bien repérables sur le terrain et donc sur les images Quickbird :

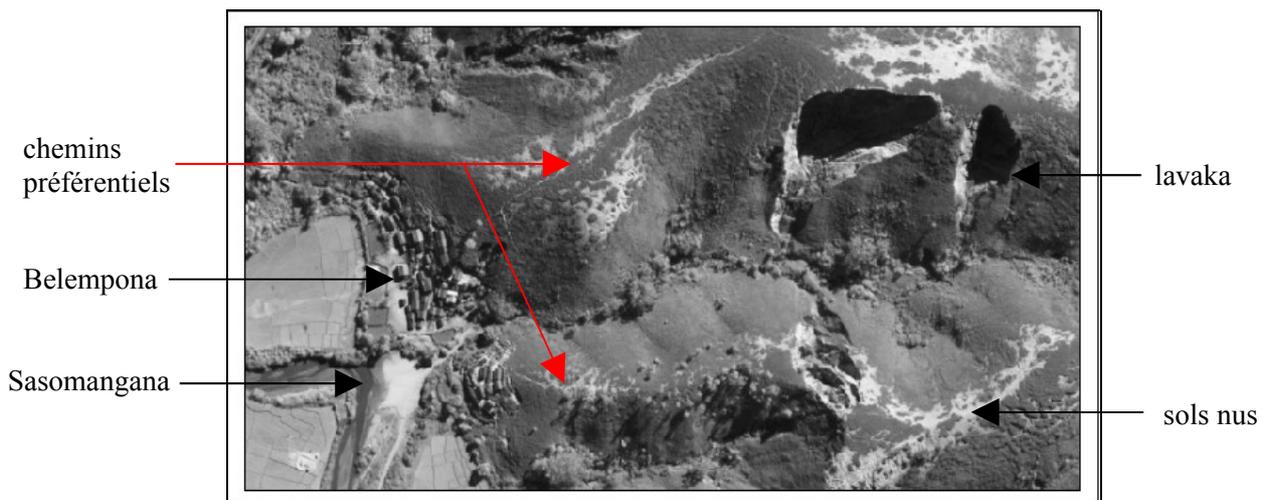


Figure 8 : Les chemins de pâture à proximité du village de Belempona

IV - CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES : LES DIFFÉRENTES FORMES D'ÉROSION

Les différentes formes d'érosion sur le bassin correspondent soit à des sols nus ou très dégradés, soit à des formes d'érosion linéaire comme les ravines et principalement les lavaka. Au total, elles couvrent une surface de 5,1 km², 6,6% de la superficie du bassin, ce qui représente davantage que les surfaces cultivées...

Les sols nus ou très dégradés, dont l'image satellite nous donne un très bon aperçu, se trouvent principalement en haut des versants. On les retrouve sur l'ensemble du bassin et ils représentent 1,2 km² de la surface totale (2,5% du bassin hors forêt).

Les lavaka (et ravines) représentent 5% du bassin versant (3,9 km²), 8% du bassin si l'on exclut la forêt primaire en amont, dont ils sont totalement absents. Cela représente une densité rapportée au bassin, hors forêt, de l'ordre de 10,5 lavaka/km², ce qui s'inscrit dans les fortes à très fortes densités selon Helisoa (1983). Ils se situent principalement au centre du bassin versant, à l'endroit où les limites du bassin se rapprochent, la largeur du bassin n'étant plus là que de 3,3 km (figure 9¹⁴). De part et d'autre, on a des altitudes de 1200 m. au nord et de 1150 m. au sud et la vallée de la Sasomangana est à 900 m. d'altitude. La pente transversale entre la ligne de crête et le niveau de base local est donc ici en moyenne plus forte qu'ailleurs, ce qui pourrait être un facteur d'explication à cette distribution des lavaka¹⁵. Dans ce secteur on peut compter jusqu'à 27 lavaka / km². On en trouve peu sur les bordures du bassin versant et, répétons le, aucun dans toute la partie amont du bassin versant (sous forêt).

¹⁴ Cette carte a été réalisée sous Mapinfo (à partir d'un carroyage d'un km²) avec une interpolation IDW (Inverse Distance Weighted) qui s'appuie sur la moyenne mobile calculée en fonction des points avoisinants ; cette méthode estime donc des tendances.

¹⁵ Un approfondissement de nos recherches sur ce point est en cours.

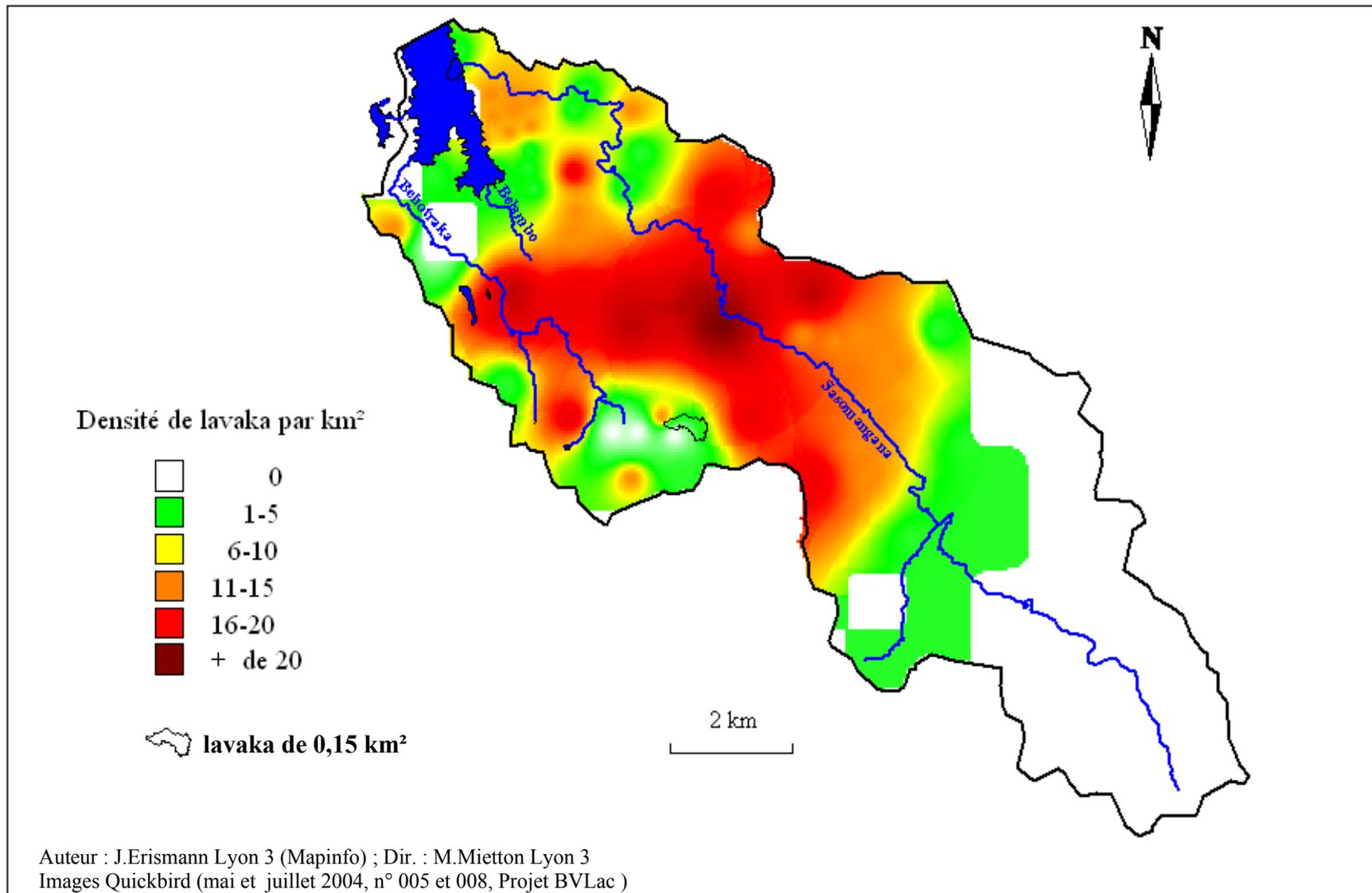


Figure 9 : Densité de lavaka par km² dans le bassin versant de Bevava

Le travail d'analyse des différentes formes d'érosion a été effectué avec le logiciel Mapinfo. Chaque lavaka, après numérisation, a été défini par une série de critères (des champs) dans le SIG. Ainsi a-t-on directement accès à ces informations en sélectionnant un lavaka sur la carte. Outre la surface des lavaka qui nous permet de faire une classification hiérarchique, nous avons choisi sept champs représentatifs permettant d'avoir un rendu cartographique et d'établir des corrélations sur l'étude des lavaka à l'échelle du bassin versant. Cette analyse statistique est encore en cours mais on peut d'ores et déjà établir quelques constats.

Les champs choisis sont les suivants :

- Caractère fonctionnel (« à vif ») du lavaka ou non (présence de lichen ou d'arbuste)
- Présence de végétation (au fond ou sur les bords du lavaka)¹⁶
- Formes intermédiaires (ravine ou relief en creux susceptible d'évoluer en lavaka)
- Lavaka ayant atteint ou non le stade d'équilibre
- Distance par rapport au réseau hydrologique
- Longueur maximale
- Largeur maximale
- Orientation

Ces indicateurs devraient également nous permettre de repérer quelles seront les zones à traiter en priorité en fonction du stade d'évolution du lavaka.

Ont été recensés au total 514 lavaka, dont 314 ont atteint un stade où ils possèdent les caractéristiques principales du lavaka (formes en toe-slope ou mid-slope, Mulder & Idoe, 2004), c'est à dire qu'ils n'en sont ni à leur stade premier d'évolution (relief en creux), ni sous forme de ravines, susceptibles d'évoluer en lavaka. Plus de la moitié (170, soit 54,8%) de ces lavaka ont atteint un stade d'équilibre (il y a profil d'équilibre lorsque les parois amont du lavaka atteignent la ligne de crête¹⁷). Cependant, ils sont encore en majorité actifs, c'est à dire sans aucune présence de lichen (140 sur les 170).

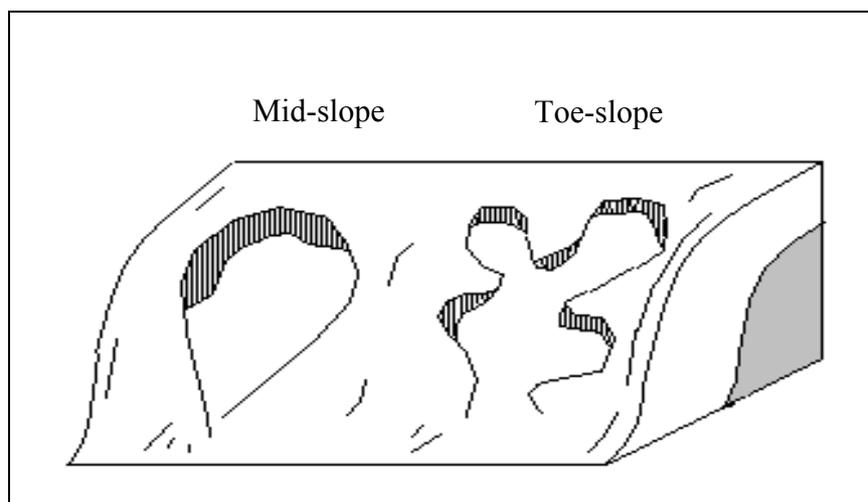


Figure 10 : Les deux principaux types de lavaka

¹⁶ Ce champ sera précisé dans nos prochaines recherches en terme d'espèces présentes dans le lavaka, ainsi que par leur position dans celui-ci.

¹⁷ Le lavaka n'est plus alors alimenté en eaux de ruissellement dans son grand axe, il peut continuer à évoluer cependant sur sa largeur mais de façon théoriquement moins accélérée.

Les autres (123) n'en sont qu'au stade premier de leur évolution c'est à dire en cuvette, de dimension très diverse, allant de 200 à 31000 m² ; enfin 81 sont représentatifs de l'érosion linéaire en ravines, susceptibles d'évoluer rapidement en une forme d'érosion beaucoup plus active.

Le plus grand lavaka, situé tout à fait en amont du sous-bassin versant de la Behotraka, a une surface de 0,15 km², une longueur maximale de 674m, pour une largeur de 354m. Il se trouve très proche (25 m) du réseau hydrographique d'ordre 1, toujours actif même si la végétation a commencé à le recoloniser. En effet des lichens sont visibles sur une partie des parois les plus abruptes, ce qui est la première phase de recolonisation par une espèce végétale, et des arbustes (type Grevillea) ou arbres (Eucalyptus) sont présents dans son goulot d'étranglement. Il a atteint son profil d'équilibre car il s'étend jusqu'à la ligne de crête. Il n'évoluera donc plus en longueur mais les parois peuvent toujours être soumises à une érosion régressive qui est cependant plus lente à opérer dans ce sens. Il est à noter qu'il ne se trouve pas dans les zones de plus fortes densités, La superficie moyenne d'un lavaka est de 7600 m² environ. 25% des lavaka ont moins de 2000 m², 75% moins de 9000 m².

La distance maximale au réseau hydrographique est de 2200m et la distance moyenne est de 280m. 25% d'entre eux sont à moins de 25m, 50% à moins de 130m et 75% à moins de 350 m.

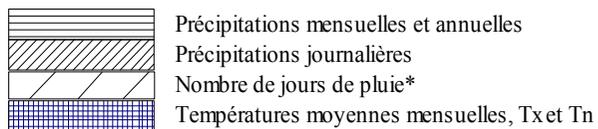
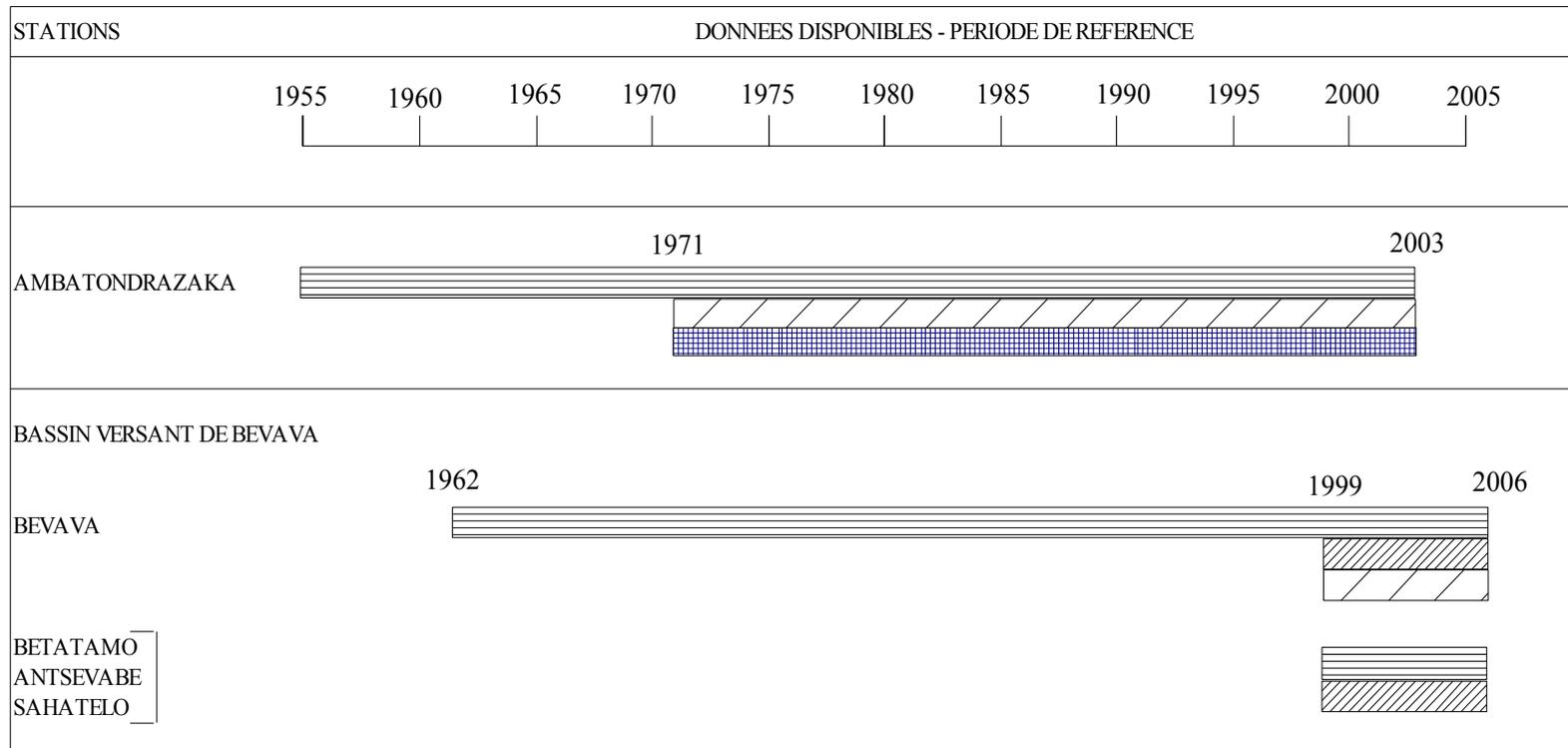
Mais les lavaka ne sont pas la seule forme d'érosion identifiée sur le bassin versant. Il y a aussi :

- les sapements de berges. Mais nous n'avons pu effectuer cette étude à ce jour. L'étude de ce type d'érosion sera approfondie lors de nos prochains travaux.
- Le ruissellement diffus sous herbe provoque également une érosion diffuse importante. Ce ruissellement important peut localement se concentrer à mi-versant ou en bas de versant et contribuer alors à une érosion linéaire de type ravine (voir rive gauche de la Sasomangana à 300 m environ du débouché de la rivière dans le lac).

Le fait que ce secteur soit une zone hyperfaillée contribue à maintenir une activité sismique pas forcément perceptible mais pouvant contribuer à une instabilité de l'épais manteau d'altérites (Mietton , 2005a).

V - CARACTÉRISATION CLIMATIQUE

Les données climatiques disponibles par station et leur période de référence sont les suivantes :



Le nombre de jours de pluie est également disponible pour Betatamo, Antsevabe et Sahatelo, mais ils n'ont pas été comptés à ce jour.

1. Le climat régional (station d'Ambatondrazaka)

La région du lac Alaotra est soumise à un climat tropical humide à deux saisons contrastées : l'une humide (au seuil mensuel arbitraire de 100 mm) qui s'étend du mois de décembre au mois de mars, l'autre sèche, d'avril à octobre (tableau 4). Deux centres d'action principaux génèrent deux flux d'alizés issus d'une part du canal du Mozambique et de l'Afrique orientale, d'autre part de l'anticyclone des Mascareignes. Il y a ici un passage graduel entre le climat des Hautes Terres et celui du versant oriental.

Le versant oriental de l'île, abrupt, accroît les phénomènes convectifs dans une masse d'air chargée d'humidité, mais pas suffisamment épaisse tout au long de l'année pour déborder sur les hautes terres. Cette façade est donc plus constamment arrosée et couverte d'une végétation forestière jusque sur l'extrême-amont du bassin versant étudié ici. Très vite vers l'Ouest, le fossé de l'Alaotra influence également la pluviosité de manière contraire, en ce sens que les alizés venus de l'Est y subissent un affaissement et un assèchement consécutif (effet de foehn).

- *Les températures* : sur la base d'une période de référence de 33 années (1971 à 2003) (tableau 3), la moyenne interannuelle est de 21,1 °C. Les mois les plus chauds sont janvier et décembre (23,7°C) et le plus froid, juillet avec 17,5°C. L'amplitude interannuelle moyenne est donc de 6,2 °C. Le maximum maximum des Tx est de 30,9°C en décembre 1987 et décembre 2001 ; le minimum minimum des Tn est 10,6°C en août 1971.

	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	moyenne
T _{my}	23,7	23,6	23,2	22,2	20,5	18,3	17,5	17,9	19,1	21,1	22,7	23,7	21,1
T _n	19,2	19,3	18,9	17,5	15,6	13,4	12,6	12,7	13,5	15,3	17,0	18,7	16,1
T _x	23,0	22,9	22,6	21,6	19,9	17,8	17,0	17,4	18,6	20,5	22,0	23,0	20,5

Tableau 3 : Températures interannuelles moyennes, maximales et minimales (°C) à Ambatondrazaka (période de référence 1971 à 2003)

La température moyenne du mois le plus froid est bien supérieure à 15 °C et les températures moyennes mensuelles se maintiennent au-dessus de 22°C pendant 6 mois : ce sont là des deux des trois conditions définies par C. Peguy pour définir la zone tropicale. Restent à considérer les précipitations.

- *Les précipitations* : sur la base d'une période plus longue de 47 années (1955 à 2003)¹⁸ (tableau 4), la moyenne interannuelle est de 1083,7 mm.¹⁹

janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	total
273,9	232,9	163,8	45,3	13,6	7,0	9,6	7,4	6,3	26,6	88,5	208,6	1083,7

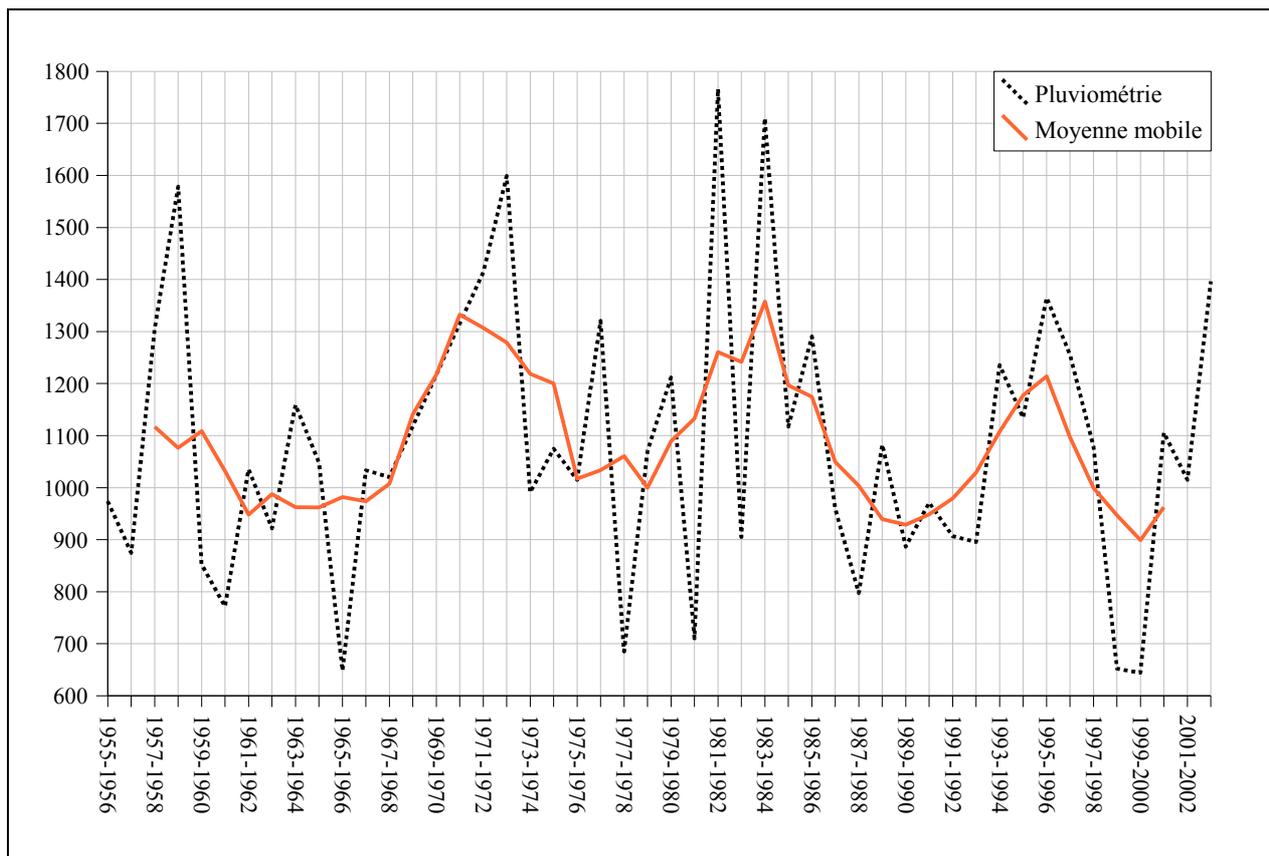
Tableau 4 : Pluviométrie interannuelle moyenne (mm) à Ambatondrazaka (Période de référence 1955-2003)

¹⁸ La période de référence n'est pas de 49 années mais de 47 années, les années 1969 et 1970 étant manquantes.

¹⁹ Une moyenne interannuelle comparable, de 1175mm, est donnée par Donque pour la période 1931-1957 (Donque, 1975) mais nous n'avons pas le détail de la pluviométrie (ni annuelle, ni mensuelle).

Au seuil des 100 mm, il y a 4 mois pluvieux ; ces mois pluvieux étant dans l'ordre décroissant janvier, février, décembre (ces trois mois étant à plus de 200mm !) et mars. L'existence de quatre mois chauds et humides au moins confirme l'appartenance selon Peguy à la zone tropicale, plus précisément à un climat tropical dit atténué. Dans les huit mois secs, deux peuvent être considérés comme des mois de transition (novembre et avril) à 50mm ou plus, l'examen détaillé des données mensuelles montrant un maximum de 276,4mm en novembre 1971 (novembre enregistre plus de 100 mm quinze années sur les 47 de la période de référence), 261,9 mm en avril 1984, voire 119,6 en mai 2002 (pluie cyclonique²⁰) ! Le nombre de jours de pluie interannuel moyen est de 124 jours. Lors du mois de janvier, le plus pluvieux, il pleut en moyenne pendant 18 jours.

Lorsque l'on considère ces pluies en moyenne mobile à cinq points sur cette période (figure 11) il apparaît très nettement d'une part des phases déficitaires : une première dans la première moitié des années soixante puis pendant la deuxième moitié des années soixante-dix avec des valeurs autour de 1000 mm et une troisième phase un peu plus marquée à la fin des années quatre-vingt et pendant la première moitié des années quatre-vingt-dix ; et d'autre part des phases excédentaires : lors de la première moitié des années soixante-dix, pendant la première moitié des années quatre-vingt (autour de 1300 mm) et une troisième phase moins marquée pendant la deuxième moitié des années quatre-vingt dix (1200 mm). Cette méthode de la moyenne mobile arithmétique, qui centre on le sait artificiellement des phénomènes dans le temps, a le mérite de faire apparaître des tendances que l'examen annuel ne peut mettre en lumière.



N.B. Les données manquantes sont interpolées : de 1968 à 1971

Figure 11 : Pluviométrie annuelle et moyenne mobile 5 points à Ambatondrazaka (période de référence 1955 à 2003)

²⁰ A Bevava, on enregistre 89 mm le 10 mai...

Un bilan hydrique du sol a été élaboré selon la méthode de Thornthwaite. Il montre un rapide épuisement des réserves d'eau qui se transforme en déficit marqué au mois de mai puis au mois de septembre et octobre, avant la reconstitution des réserves en novembre.

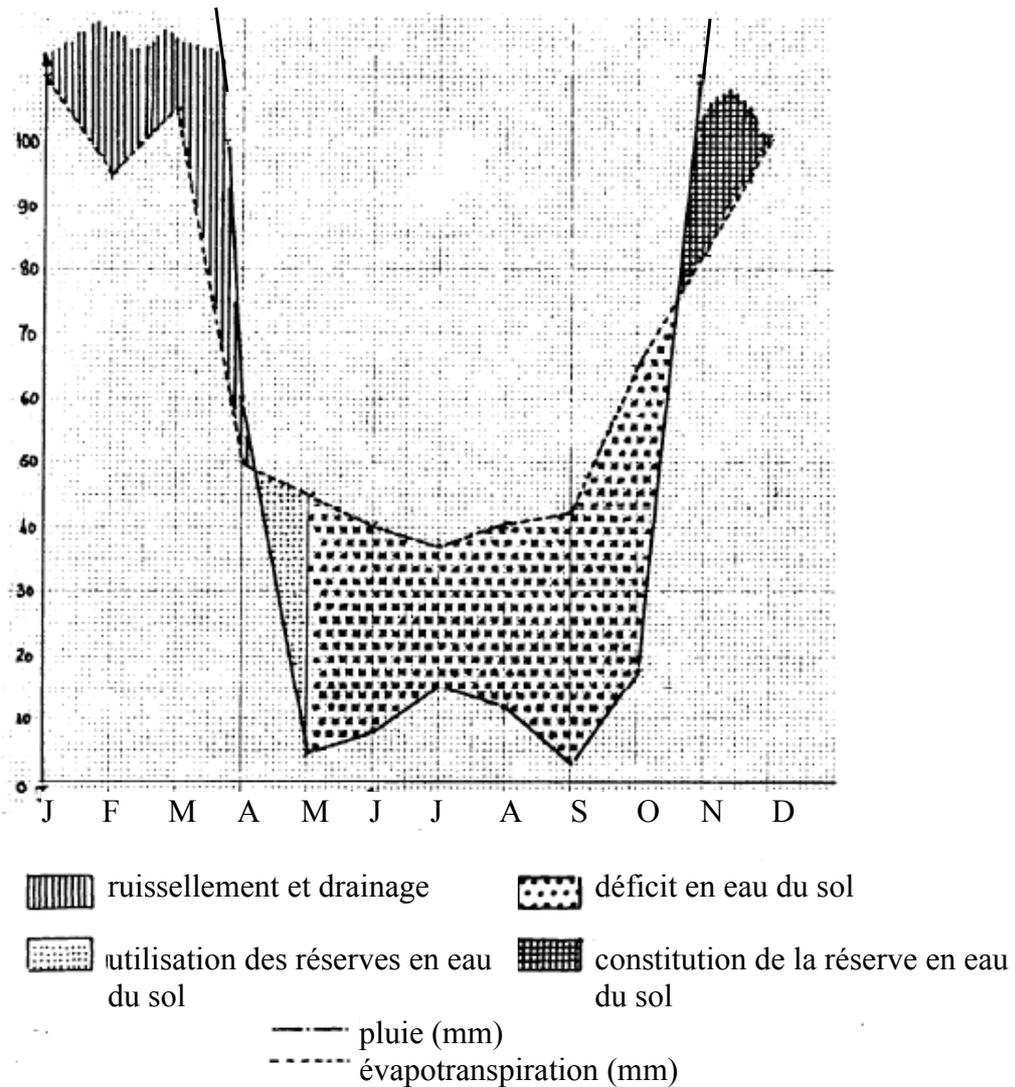


Figure 12 : Bilan hydrique à Ambatondrazaka (Donque, 1975)

- de la mi-octobre à début avril P est supérieure à ETP ; de la mi-octobre au mois de décembre toutes les eaux s'infiltrent et constituent la réserve d'eau dans le sol et, de décembre à avril, les excès d'eau ruissellent en surface. Sur les versants, on a un fort ruissellement qui entraîne une augmentation de la perte en terre et accentue les ravines ou les lavaka dès que les sols sont saturés
- de début avril à la mi-octobre, ETP est supérieure à P : de début avril à mai, le sol peut utiliser les ressources constituées au début de la saison des pluies. Mais la durée de reconstitution de ces ressources souterraines est longue (N. Andriamampianina, 1988) car les fortes températures favorisent l'évaporation. Enfin, de mai à mi-octobre, il y a un déficit en eau.

Ces irrégularités pluviométriques se retrouvent à l'examen détaillé des données pluviométriques du bassin de Bevava, sur une période de référence plus courte (1999-2000 à nos jours).

2. Le climat local du bassin versant de Bevava (J. Erismann, 2005 ; M. Mietton, 2005a)

- Les données pluviométriques disponibles à l'échelle du bassin versant sont celles :

d'une part de la station pluviométrique de Bevava équipée d'un pluviomètre depuis 1963 ;

d'autre part des quatre stations de Betatamo, Antsevabe, Sahatelo équipées d'un pluviomètre et d'un pluviographe depuis novembre 1999, et de la station de Bevava pour laquelle un pluviographe a été associé au pluviomètre précédent, depuis cette même date de novembre 1999 (figure 6, p. 15).

Ces quatre stations équipées en novembre 1999 par BRL l'ont été en fait pour le suivi climatique de trois bassins contigus alimentant la vallée Marianina. Le poste de Betatamo a été installé pour le suivi du bassin versant de la Lohafasika, à l'ouest du lac de Bevava ; la station d'Antsevabe pour le bassin de l'Harave à l'est et les stations de Bevava et Sahatelo pour le bassin de la Sasomangana (figure 13). Ces postes se situent à des altitudes un peu inférieures aux altitudes moyennes des bassins versants considérés (Bevava : 822 m., Betatamo : 858 m., Antsevabe : 894 m., Sahatelo : 958 m.²¹). Mais c'est surtout l'accessibilité qui compte dans ces milieux : ces postes sont donc à la fois proches des villages, afin que le relevé de l'observateur puisse être effectué de manière régulière, et également accessibles à moto ou à pied pour le suivi par un technicien du bureau d'études BRL.

On tire donc parti de ces quatre stations (dont deux sont à la marge du bassin de la Sasomangana) à travers les polygonations de Thiessen que nous aborderons plus loin. Il faut noter que dans ce vaste pays, dont le réseau d'observations climatiques national est très peu fourni, la présence de quatre stations sur un bassin versant de 75 km² est très appréciable.

Chaque station est équipée d'un pluviographe à augets basculeurs électromécanique et d'un pluviomètre, proches l'un de l'autre (sauf à Bevava où ils sont à quelques centaines de mètres : le pluviographe étant à proximité immédiate de la digue et le pluviomètre au coeur du village).

Le travail de dépouillement des pluviogrammes nous aura conduit à traiter près de 400 enregistrements graphiques²² de pluies efficaces, considérées supérieures à 20 mm de pluie ; étant entendu que deux pluies sont distinctes si elles sont séparées par un intervalle de temps supérieur à quatre heures.

²¹ Altitudes fournies par BRL (Bas Rhône Languedoc)

²² Ce dépouillement des diagrammes a nécessité quatre à cinq mois de travail en temps cumulé.

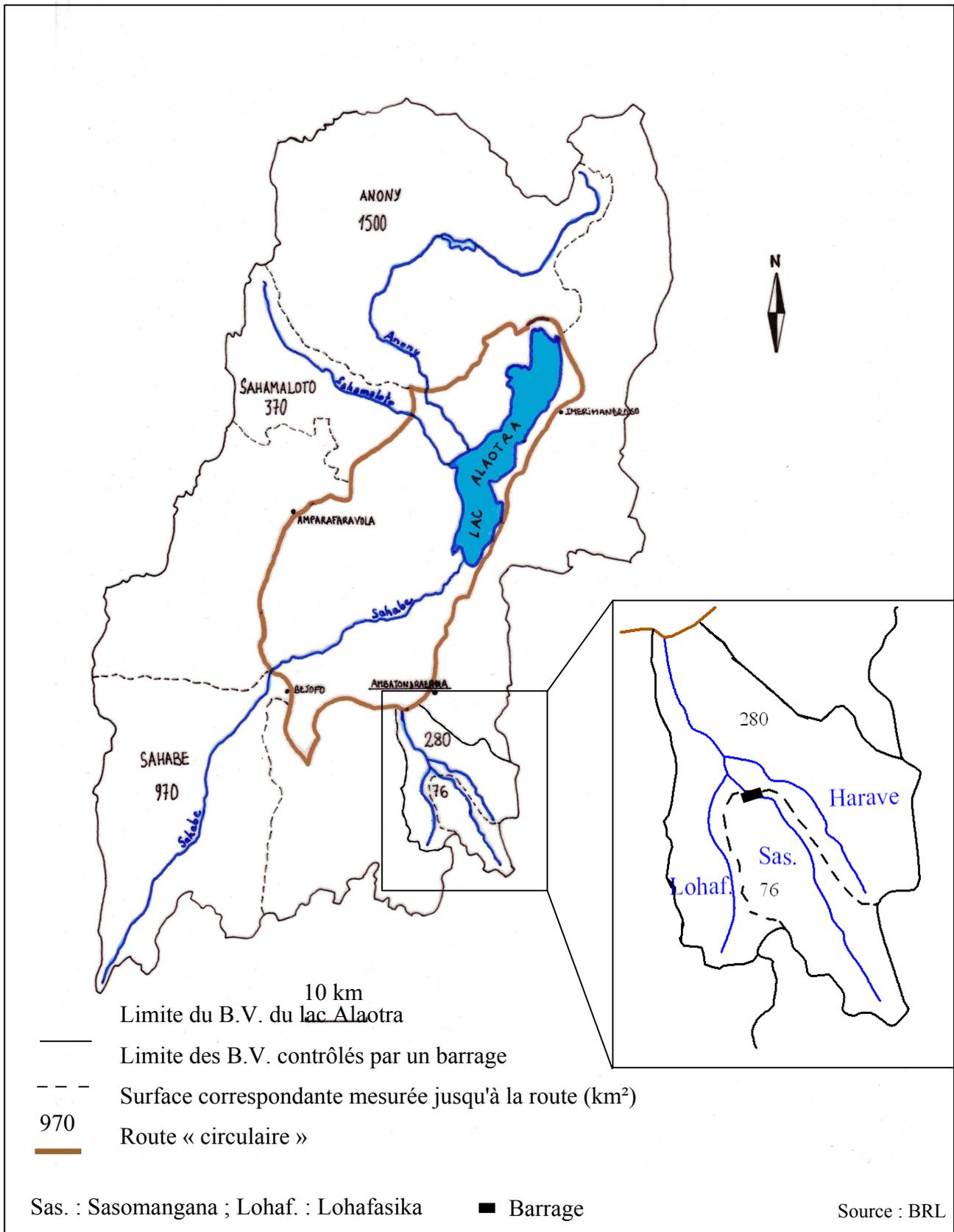


Figure 13 : Situation des bassins contrôlés par un barrage

- Les pluies mensuelles à Bevava (période de référence 1962-1963 à nos jours) :

Les données disponibles ne sont que des données mensuelles pour la période 1962 à 1999 ; elles sont journalières pour la période 1999 à mars 2006.

Pour la période 1962 à 1999, de nombreuses lacunes apparaissent malheureusement, précisées dans le tableau ci-dessous. Pour les périodes incomplètes, notre choix a été le suivant : retenir les précipitations mensuelles pour chacun des mois renseignés et en revanche éliminer le total annuel pour chacune des années incomplètes. Dans le tableau ci-dessous sont donc éliminées²³ douze campagnes ; la période de référence n'est donc que de 32 années hydrologiques (tableau 5).

	nombre de mois manquants	mois manquants	total annuel retenu ou non
1962 - 1963	3	oct. à déc.	non
1963 à 1988	0		<i>oui</i>
1988 - 1989	9	janv. à sept	non
1989 - 1990	4	oct. à déc. et sept.	non
1990 - 1991	4	juin à sept.	non
1991 - 1992	4	oct., mai, août, sept.	non
1992 - 1993	2	oct et août	non
1993 - 1994	1	sept.	non
1994 - 1995	1	août	non
1995 - 1996	7	oct., nov. et mai à sept.	non
1996 - 1997	5	oct. et juin à sept.	non
1997 - 1998	5	oct., mai à août	non
1998 - 1999	5	oct., nov., mai, juin et sept.	non
1999 - 2006	0		<i>oui</i>
fin des données pluviométriques : mars 2006			

Tableau 5 : Critique des données pluviométriques mensuelles et annuelles à la station de Bevava

La moyenne interannuelle est donc de 1048,6 mm, soit une valeur comparable à celle calculée à la station d'Ambatondrazaka. Un maximum de 1807 mm a été enregistré lors de la campagne 1983-84 ; un minimum de 513 mm survient en 1999-2000, ce qui donne un indice de variation marqué (3,5) (M. Mietton, 2005a) dans cette zone tropicale. On enregistre un maximum secondaire de 1445 mm en 2002-03. L'indice de variation est presque aussi élevé (2,8) pour les cinq dernières années.

²³ Cette élimination se justifie sans conteste pour 10 des 12 années durant lesquelles ce sont des mois pluvieux qui ne sont pas renseignés. En revanche, les années 1993-94 et 1994-95 auraient pu aussi bien être rajoutées à la série.

	janv.	févr.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
moyenne	247,9	217,4	152,9	41,7	12,6	6,7	7,2	7,1	5,0	27,9	88,3	224,7	1048,6
nombre de mois ou années renseignées	43	43	43	43	39	37	38	35	35	36	40	42	32

Tableau 6 : Moyenne interannuelle mensuelle à la station de Bevava

Au seuil des 100 mm, on retrouve également 4 mois pluvieux (tableau 6) mais dans un ordre différent de celui d'Ambatondrazaka : dans l'ordre décroissant, janvier puis décembre, février (supérieurs à 200 mm) et mars. Le mois de novembre (mois de transition) enregistre un maximum de 290,6 mm en 1984 et un maximum secondaire de 284,1 mm en 1971 (l'année où la valeur la plus élevée pour ce mois a été enregistrée à Ambatondrazaka). De plus, le mois de novembre a une pluviométrie supérieure à 100 mm pendant 16 années sur les 40 qui sont renseignées. Le mois d'avril enregistre un maximum de 211,9 mm en 1984 également.

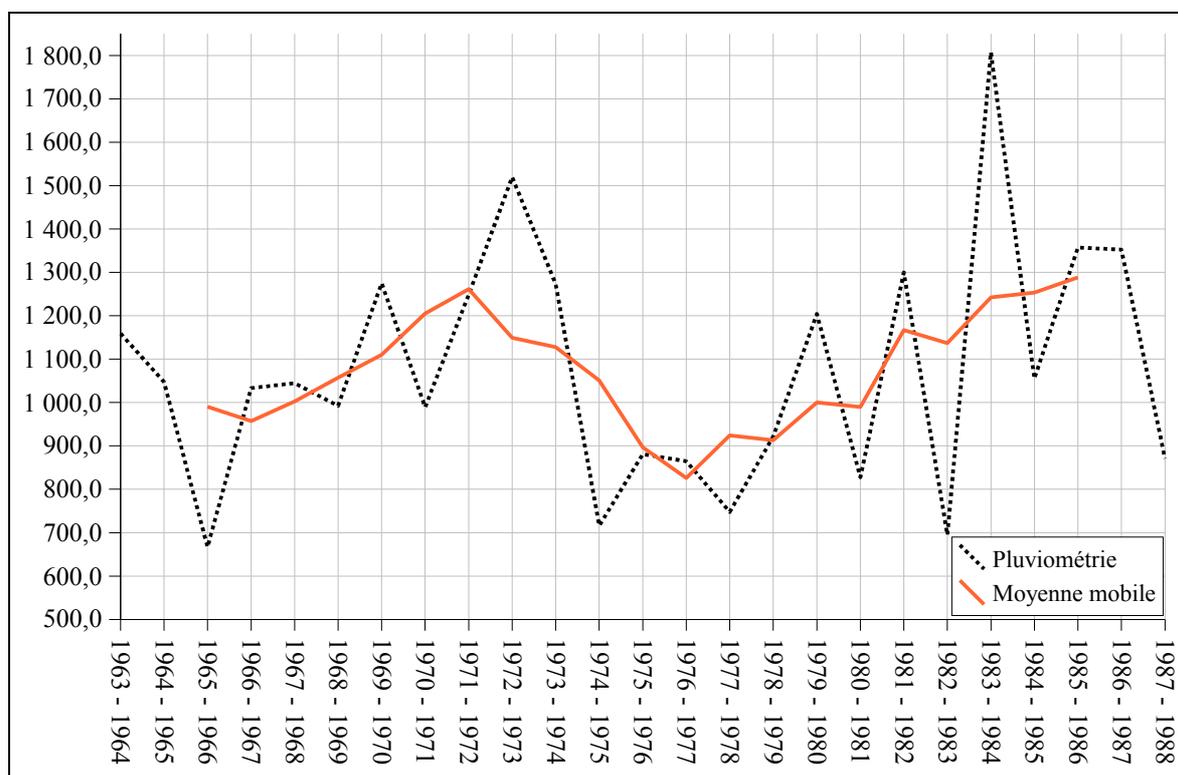


Figure 14 : Pluviométrie annuelle et moyenne mobile 5 points à Bevava (période de référence 1963 à 1988)

Compte tenu des lacunes trop nombreuses durant les années 90, la courbe des moyennes mobiles (5 points) n'est représentée que sur l'intervalle 1963-1988. La figure 14 met en évidence une phase déficitaire lors de la deuxième moitié des années soixante-dix, et deux phases plus humides pendant la première moitié des années soixante-dix et pendant la première moitié des

années quatre-vingt. Malgré la distance entre les deux sites (14 km en ligne droite), ces phases correspondent, tant en terme de quantité que de périodicité, à celles repérées à Ambatondrazaka.

– Les pluies journalières sur le bassin versant de Bevava :

Les périodes de référence de ces pluies journalières sur les quatre stations précitées du bassin et par appareil sont précisées dans le tableau ci-dessous.

	Pluviographe	Pluviomètre
Bevava	nov.1999 à juin 2005	oct. 2000 à mars 2006
Betatamo	nov. 1999 à juil. 2005	oct. 2000 à mars 2006
Antsevabe	nov. 1999 à juil. 2005	oct. 2000 à mars 2006
Sahatelo	nov. 1999 à août 2005	oct. 2000 à mars 2006

Tableau 7 : Données pluviométriques journalières du bassin versant de Bevava

Les précipitations journalières, sur la période de référence 1999 à 2006, dépassent fréquemment les 100 mm en saison des pluies comme à Sahatelo où le maximum enregistré, toutes stations confondues, est tombé le 27 février 2003 avec 137 mm (relevé du pluviomètre). Le 10 mai 2002, le bassin versant a également subi de fortes pluies avec 130 mm à Sahatelo, 95 mm à Antsevabe, 104,7 mm à Betatamo et 89 mm à Bevava en raison du cyclone Kesiny qui a touché le nord de l'île et atteint la région sous forme d'une tempête tropicale modérée... La pluie moyenne calculée avec la méthode de Thiessen sur le bassin de Bevava à cette même date est importante, atteignant 115 mm (111,5 mm à Bevava en 24h entre le 10 et le 11 mai au matin). Sur deux jours consécutifs, le maximum maximum est de 205 mm les 2 (113,5 mm) et 3 (92 mm) mars 2004 !

Les lacunes relatives à ces données journalières sont explicitées ci-dessous.

- La critique des données journalières

Plusieurs types de questionnements apparaissent à la lecture de ces données :

- de concordance dans le temps entre les deux types de données (pluviomètre et pluviographe) d'une même station. Trois cas de figure peuvent être relevés :

- celui où une même pluie sur le pluviogramme (exemple : 20 mm) est divisée artificiellement en deux pluies distinctes (exemple : 10 et 10 mm) par l'observateur du pluviomètre. Ce problème apparaît parfois en raison de l'heure de relevé du pluviomètre qui s'effectue vers 7-8h du matin alors que l'épisode pluvieux n'est pas terminé ;

- celui où deux pluies identiques au pluviomètre et au pluviographe sont inscrites à deux dates différentes (j et j+1) soit par erreur de l'observateur, soit par dysfonctionnement du pluviographe. Ces décalages temporels de l'ordre d'une journée sont facilement repérables et peuvent être aisément corrigés.

- celui où des décalages dans le temps et des différences quantitatives se cumulent sur une période assez longue (par exemple durant la première quinzaine de février 2002 à Sahatelo).

- de perte absolue de données, surtout au niveau des pluviographes qui connaissent des dysfonctionnements divers : pannes de stylet, des piles et ralentissement ou arrêt de l'enregistrement, bourrage de papier, manque de rouleaux de diagrammes etc.. Cette perte

d'information, si l'on ne considère que les seules pluies supérieures à 20 mm, considérées comme les pluies efficaces, peut atteindre jusqu'à 49% (en volume) des précipitations totales de la campagne comme à Antsevabe en janvier 2001. En nombre, ces événements non enregistrés durant les cinq campagnes (de 2000-2001 à 2004-2005) sont de 57 pour Sahatelo, 37 pour Bevava, 22 pour Antsevabe et 20 pour Betatamo !

- de différences pluviométriques étonnantes pour une même station entre les deux appareils ou bien entre stations. Sur une même station, les totaux mensuels des deux types d'appareils ont été systématiquement confrontés. Lorsqu'une grande différence apparaît, nous avons retenu préférentiellement des ordres de grandeur similaires entre les stations de Bevava et Betatamo (très proches et en aval du bassin versant) d'une part, entre les stations d'Antsevabe et Sahatelo d'autre part. Cette méthode d'analogie spatiale a cependant ses limites pour le "couple" Antsevabe-Sahatelo car la station de Sahatelo plus proche de la forêt et de l'escarpement oriental, plus arrosée, semble obéir à des mécanismes pluviogéniques quelque peu particuliers.

Lorsqu'un doute persiste à une date donnée, le diagnostic de fonctionnement du pluviographe a été fait pour les mois précédents et suivants. Si des problèmes sont recensés sur l'appareil, il nous est apparu plus cohérent de prendre les valeurs relevées au pluviomètre.

Au total, ce sont donc les valeurs du pluviomètre - sauf cas exceptionnels²⁴ – qui ont été retenues, notamment pour le calcul des pluies moyennes.

- L'agressivité climatique

L'étude à l'échelle journalière des pluviogrammes (précision graphique 1mm sur le diagramme = pas de temps de 6 minutes) fournit des informations précieuses en terme d'intensité instantanée, d'intensité-durée, d'intensité maximale au seuil de 30 minutes et également en terme d'agressivité des pluies. Toutes ces données aideront à mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant et par là-même le remplissage du lac de retenue du barrage de Bevava.

Les indices d'agressivité annuels (tableau 8) peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 900 points²⁵ (942 à la station de Sahatelo, lors de la campagne 2001-2002²⁶). C'est d'ailleurs à cette station que l'agressivité est la plus importante pour trois des campagnes sur les quatre qui sont quasi complètes (de 1999 à 2003). De manière générale, cette agressivité augmente vers le SE forestier du bassin, même si, pour la campagne 2002-2003, le maximum est atteint à Betatamo (786 points).

²⁴ Par exemple, à Sahatelo au mois de janvier 2001, le pluviographe a enregistré 801 mm alors que le relevé du pluviomètre donne seulement 176,5 mm. Or, ce même mois, l'ordre de grandeur des précipitations pour les trois autres stations est supérieur à 500 mm, alors même qu'à Sahatelo les pluies sont toujours plus élevées globalement. La station de Sahatelo est parmi les quatre celle qui pose le plus de problèmes (absences de l'observatrice ?).

²⁵ Unités américaines (R_{USA})

²⁶ Alors que nous n'avons les données qu'à partir du mois de janvier.

CAMPAGNE	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
1999-2000	69	119	226	347
2000-2001	256	454	551	613
2001-2002	269	511	222	942 ²
2002-2003	594	786	744	519
2003-2004	77 (nov. seul)	154	110	93 ³
2004-2005	488,5	289 ¹	504	284
dernier mois disponible	juin	août	août	août

¹ : il manque les mois d'octobre à décembre

² : il manque les mois d'octobre à décembre

³ : il manque les mois d'août et septembre

Tableau 8 : Indice d'agressivité annuel par station du bassin selon la méthode de Wischmeier

L'ordre de grandeur de Ra est le plus souvent de 500 unités, ce qui est la valeur attendue dans ce régime tropical à deux saisons contrastées.

A l'échelle mensuelle (annexe 1), ce sont les mois de décembre et de janvier qui enregistrent les valeurs les plus élevées, en tête à sept reprises pour chacun de ces mois avec des valeurs allant jusqu'à 526 points pour Sahatelo en janvier 2001, ce qui est le maximum maximorum (85 % de l'agressivité totale de la campagne) ! Puis viennent les mois de février (à 5 reprises avec une valeur maximale de 467 points toujours à Sahatelo en 2002), mars (à 4 reprises avec une valeur maximale de 123 points à Betatamo en 2001) ; le mois de novembre apparaît une fois comme le plus agressif à Bevava lors de la campagne 2002-2003 avec une valeur toutefois modérée de 77 points.

On remarque également que ces pluies de plus de 20 mm ayant une agressivité certaine peuvent avoir lieu à n'importe quel moment de l'année (hormis les mois de juin à août), y compris au mois de mai comme à Sahatelo en 2002 (226 points), même si cela reste peu fréquent et que cette agressivité était liée au cyclone Kesiny. Le cyclone Gloria des 1er, 2 et 3 mars 2000 a également engendré de très fortes précipitations avec l'agressivité la plus forte de cette campagne (159 à Sahatelo le 1er mars avec un seuil de 30 mm/h dépassé pendant 42 minutes) même si cet événement ne représente pas un record absolu pour chacune des quatre stations. Des épisodes cycloniques peuvent expliquer mais en partie seulement ces extrêmes que nous allons à présent analyser de manière plus systématique.

L'étude des indices unitaires d'agressivité nous apporte des informations supplémentaires et nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux cinq valeurs les plus fortes de chaque campagne (annexe 2). Ces valeurs extrêmes ont été couplées à l'intensité instantanée maximale en mm/h pendant x minutes de ces épisodes pluvieux ainsi qu'à l'intensité-durée (cumul en minutes par rapport à un seuil de 30 mm/h) afin de rendre compte des mécanismes de saturation instantanée ou plus durable des sols. Ces valeurs unitaires sont très élevées, dépassant même les 200 points à Sahatelo (231 points le 11 février 2002 pour une pluie de 112 mm qui a débuté à minuit et fini à 10h du matin avec une intensité instantanée maximale de 156 mm/h sur 24 minutes !). Vingt-quatre heures plus tard on enregistrait également un maximum, cette fois tout en aval du bassin versant à Betatamo avec une valeur de 218 points pour une pluie de 127 mm qui a commencé à midi avec une intensité instantanée maximale tout aussi élevée de 108 mm/h en 18 minutes. Toutefois, on peut considérer que de manière générale ces indices unitaires sont plus élevées en amont du bassin versant, qui est plus forestier et plus montagneux, à la station de Sahatelo (3 maximums et 1 maximum secondaire sur les cinq campagnes complètes, à savoir sans la campagne 2003-04)

Combinée à une tentative de spatialisation des pluies (encore en cours), à l'état de surface et au degré de vulnérabilité des sols, cette étude précise de l'agressivité des pluies devrait nous permettre de déterminer des corrélations entre précipitations et remplissage en eau et en sédiments du lac.

Partie 2
Modalités de remplissage en eau et en sédiments
du lac de retenue de Bevava

Les relations pluie-débit, que l'on se propose de cerner sur ce bassin versant de Bevava, sont encore incertaines pour différentes raisons.

En fait :

1 - les débits eux-mêmes des rivières alimentant le lac ne sont pas mesurés et cette entrée dans le bilan hydrologique de la retenue n'est connue qu'à travers l'appréciation d'une variation de hauteur du plan d'eau. Le niveau du lac est contrôlé par un limnigraphe situé sur la tour de prise d'eau, en rive gauche du lac près de la digue.

2 - Mais la variation de hauteur du plan d'eau est elle-même sous influence d'autres paramètres de sorties : lâchers (d'irrigation) connus (fiches récapitulatives de fonctionnement), infiltration et évaporation en revanche méconnues.

Par ailleurs, la réponse hydrologique à une pluie donnée est mal cernée car on ne connaît pas à ce jour le temps de restitution en forêt à l'amont du bassin, ni même le temps d'écoulement depuis le pont de la route de Sahatelo en amont (au sortir du bassin forestier) jusqu'à l'exutoire de la Sasomangana dans le lac de retenue.

En conséquence :

- à ce jour, il ne nous a été possible d'établir un bilan hydrologique qu'à une période sans pluie mais durant laquelle on a mesuré les débits instantanés des cours d'eau débouchant dans le lac (juin 2005).
- dans un proche avenir (juillet-septembre 2006), tirant enseignement des difficultés précitées, les méthodes de travail seront améliorées grâce à la construction d'une passerelle sur la Sasomangana et d'une station hydrométrique associée, où seront enregistrées en continu les hauteurs (limnigraphe et échelle limnimétrique) et mesurés les débits instantanés (jaugeages mécaniques). En outre, un colorant (fluorescéine) sera apporté à Madagascar pour mesurer les temps de transfert du flux d'eau depuis l'amont jusqu'à l'aval du bassin.
- les relations pluies-débits donneront lieu pour l'heure à des approches de coefficients d'écoulement et à une typologie des situations.

I - Un bilan hydrologique précis mais ponctuel dans le temps

1- Introduction

On rappelle que le bilan hydrologique du lac peut s'écrire :

$$\Delta V = Q_1 + Q_2 + P - E - I - F$$

ΔV , variation du volume d'eau dans la retenue, intègre des « entrées » et des « sorties ».

Les variations du volume d'eau sont appréciées à travers des variations limnimétriques de côtes du lac. Ces dernières ont été établies d'abord à l'échelle mensuelle, depuis la campagne 1993-1994, pendant la période d'ouverture des vannes uniquement (environ d'octobre à avril-mai selon les besoins spécifiques de chaque campagne) ainsi que les volumes lachers (et les pluies mensuelles correspondantes, comme il a été vu précédemment)²⁷. Ce n'est qu'à partir du mois d'octobre 2000 que l'information devient journalière et ce jusqu'à la mi-mai 2006.

Ces côtes sont connues soit par lecture directe d'une échelle limnimétrique²⁸ (« échelle ORSTOM »), située à l'extrémité de la digue en rive gauche, soit par enregistrement d'un limnigraphe mécanique installé sur la tour de prise d'eau.

Les entrées : elles correspondent d'une part aux apports des rivières du bassin versant (Sasomangana Q1 et Behotraka Q2), et d'autre part aux apports directs (P) des précipitations ; ce dernier facteur étant lui-même corrélé aussi à la surface du plan d'eau elle-même en relation avec la côte !²⁹

Les sorties :

- l'évaporation, calculée ici selon la méthode Thornthwaite, facteur climatique, mais également corrélé à la surface du lac
- l'infiltration, I, dans le fond du lac et probablement aussi dans la digue elle-même du lac de retenue³⁰
- les fuites (F) éventuelles au niveau de la prise d'eau (joint défectueux) et visibles dans ce cas à l'amont du canal principal d'irrigation.

²⁷ Cela pose un problème en terme de méconnaissance des valeurs minimales et maximales des cotes du plan d'eau mais nous renseigne cependant utilement sur une tendance des variations du plan d'eau lors de la période d'irrigation (où les variations, comme les pluies, sont les plus grandes).

²⁸Le dernier élément métrique (20 - 29 dm.) n'est plus en place. Il sera remplacé lors de notre prochaine mission (juillet 2006). La correspondance entre ces côtes relatives et les hauteurs absolues (NGM) sont établies au niveau du déversoir du barrage (côte absolue : 820,02 m., dont on rappellera qu'elle a été rehaussée lors des derniers travaux sur le barrage en 1991 (côte absolue antérieure du déversoir : 817,52 m.).

²⁹Les courbes de cubature (notamment hauteur-volume) sont effectivement établies.

³⁰Une surveillance piézométrique du barrage-digue est théoriquement assurée depuis l'origine du barrage. Depuis 1991, les mesures ne sont plus effectives et les données antérieures n'ont pu être retrouvées. Les piézomètres colmatés ne sont plus fonctionnels aujourd'hui. Une surveillance devrait être mise en place afin d'éviter d'éventuels problèmes de drainage interne à (ou sous) la digue qui pourraient conduire jusqu'à sa rupture.

2 - Le bilan hydrologique du 21 au 23 juin 2005

Il est apparu intéressant au mois de juin 2005 au moment de la mission de M. Mietton, alors que le bilan est simplifié à ce moment là par l'absence de pluies et de lachers, de cerner les autres facteurs.

Entre le 21 et le 23 juin 2005, la côte du lac a augmenté de 3cm. A l'aide de la courbe de cubature (figure 18, p. 49), nous avons les volumes emmagasinés par le lac correspondant à ces côtes (appréciées au déversoir) ainsi que les surfaces correspondantes :

21/06/05 : 819.70 soit 26 205 000 m³ et 2 895 508 m²
 23/06/05 : 819.73 soit 26 299 500 m³ et 2 906 407.2 m²

- Les entrées :

Des mesures de débit ont pu être effectuées grâce à un micro moulinet prêté par BRL (tableau 10) : les deux principales rivières du bassin ont été jaugées (facteurs d'entrées) :

- la Sasomangana en amont, au sortir de la forêt (à proximité de Sahatelo) et en aval, à proximité du village d'Amboasary situé à 2,6 km du lac (Q1).
- la Behotraka à proximité de l'embouchure (Q2).

DATES	SASOMANGANA AMONT*	SASOMANGANA AVAL*	BEHOTRAKA*	CANAL PRINCIPAL**	COTES LUES AU DEVERSOIR	COTES RELEVÉES (limnigraphe)
21/06/2005	0,16	0,63			819,70	819,69
23/06/2005			0,05	0,08	819,73	819,71

Tableau 10 : Côtes, débits d'entrées* et de fuite dans le lac de retenue**

Ainsi pour une augmentation de la hauteur du lac de 3 cm, nous avons une augmentation du volume de 94 500 m³ en deux jours, soit 47 250 m³/jour et une variation de surface de 10899.2 m² pour deux jours soit 5449.6 m²/jour

Les précipitations étant nulles ces jours, l'apport se limite aux écoulements du bassin versant, c'est à dire de la rivière principale Sasomangana et de la Behotraka. Les jaugeages effectués à ces dates donnent les résultats suivants :

- Sasomangana à Amboasary (le 21 juin) : $Q_1=0.625 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 54000m³/jour
- Behotraka aval (le 23 juin) : $Q_2=0.052 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 4492.8 m³/jour

- Les pertes :

Il n'y a eu aucun prélèvement. Cependant, nous avons observé une fuite non négligeable au canal principal d'irrigation, due à un joint défectueux.

- Fuite (le 23 juin) : $0.078 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $F= 6739.2 \text{ m}^3/\text{jour}$

-Évaporation : elle est calculée selon la formule de Thornthwaite³¹ (annexe 8). Les données d'évaporation fournies par BRL n'étant pas les mêmes que celles calculées avec la formule, les deux cas seront présentés ici :

Cas n°1 (formule de Thornthwaite) :

L'évaporation au mois de juin est de 119.01mm/mois soit 3.96mm/jour soit 39.6m³/ha de retenue

Convertit en valeur journalière, cela équivaut à : $E_1 = 290,640 \text{ ha} \times 39.6$
 $= 11\,507.76 \text{ m}^3/\text{jour}$

Le bilan hydrologique est donc le suivant :

$$\Delta V = Q_1 + Q_2 - E_1 - F - I_1$$

ou

$$I_1 = Q_1 + Q_2 - E_1 - F - \Delta V$$

$$I_1 = 54000 + 4493 - 11507.76 - 6739.2 - 47250$$

$$= -7004.16 \text{ m}^3/\text{jour}$$

soit $I_1 = 7004.16 / 2\,906\,407.2 = 0.0024 \text{ m}/\text{jour}$ soit 2,4mm/jour

Cas n°2 (données BRL) :

L'évaporation au mois de juin est de 58.5 mm/mois soit 1.95 mm/jour soit 19.5 m³/ha de retenue

Convertit en valeur journalière, cela équivaut à : $E_2 = 290,640 \text{ ha} \times 19.5$
 $= 5667.5 \text{ m}^3/\text{jour}$

Le bilan hydrologique est donc le suivant :

$$\Delta V = Q_1 + Q_2 - E_2 - F - I_2$$

$$I_2 = 54000 + 4493 - 5667 - 6739 - 47250$$

$$= -1163.9 \text{ m}^3/\text{jour}$$

soit $I_2 = 1163.9 / 2\,906\,407.2 = 0.0004 \text{ m}/\text{jour}$ soit 0.4 mm/jour

La valeur d'évaporation calculée dans les deux cas varie dans un rapport de 1 à 6. Ces valeurs, élevées dans l'absolu, sont à mettre en relation d'une part avec la charge de la retenue puisque le niveau du lac est quasi à son maximum (niveau de déversement : 820,02 m.), et d'autre part avec une éventuelle « porosité » de la digue (voir note 30)

³¹Les données manquent pour utiliser la formule plus satisfaisante de Penman.

II - Relation pluie-débit et typologie

1 - Les grands traits des variations du plan d'eau à Bevava (2000-2006)

Le lac de retenue possède un volume variant de 27,2 Mm³ à la côte maximale de 820,02 avant déversement, à 3,1 Mm³ pour la plus basse côte connue d'une valeur de 807,84 NGM le 25 avril 2006 (soit un volume utilisable de 654 000 m³ pour ce dernier cas, sachant qu'il reste toujours une réserve dans le lac de 2,5 Mm³). L'objectif de cette retenue est de soutenir l'irrigation de 3500 ha de rizières dans la vallée Marianina et le PC 15.

Le remplissage de la retenue est lié principalement aux précipitations et à leurs différentes caractéristiques, mais aussi à l'importance des prélèvements pendant la campagne ainsi qu'à l'état du lac en début de campagne lui-même lié aux conditions d'utilisation durant la campagne précédente. On peut distinguer de ce point de vue deux cas de figure très nets (figure 15) : d'une part, les campagnes 2002-03 et 2004-05 qui se terminent à pleine charge et le lac déverse. Le lac d'autre part, les quatre autres campagnes qui débutent avec un niveau du lac à 4 ou 5 mètres (voire 8 m. en 2000-2001) au-dessous du niveau de débordement.

Pour autant, les besoins en eau d'irrigation sont surtout satisfaits par le rendement hydrologique des précipitations puisque les deux campagnes (2002-03 et 2004-05), pour lesquelles on enregistre un (et même deux !) déversement(s), démarrent avec des niveaux assez bas (814,5 et 816 m.)

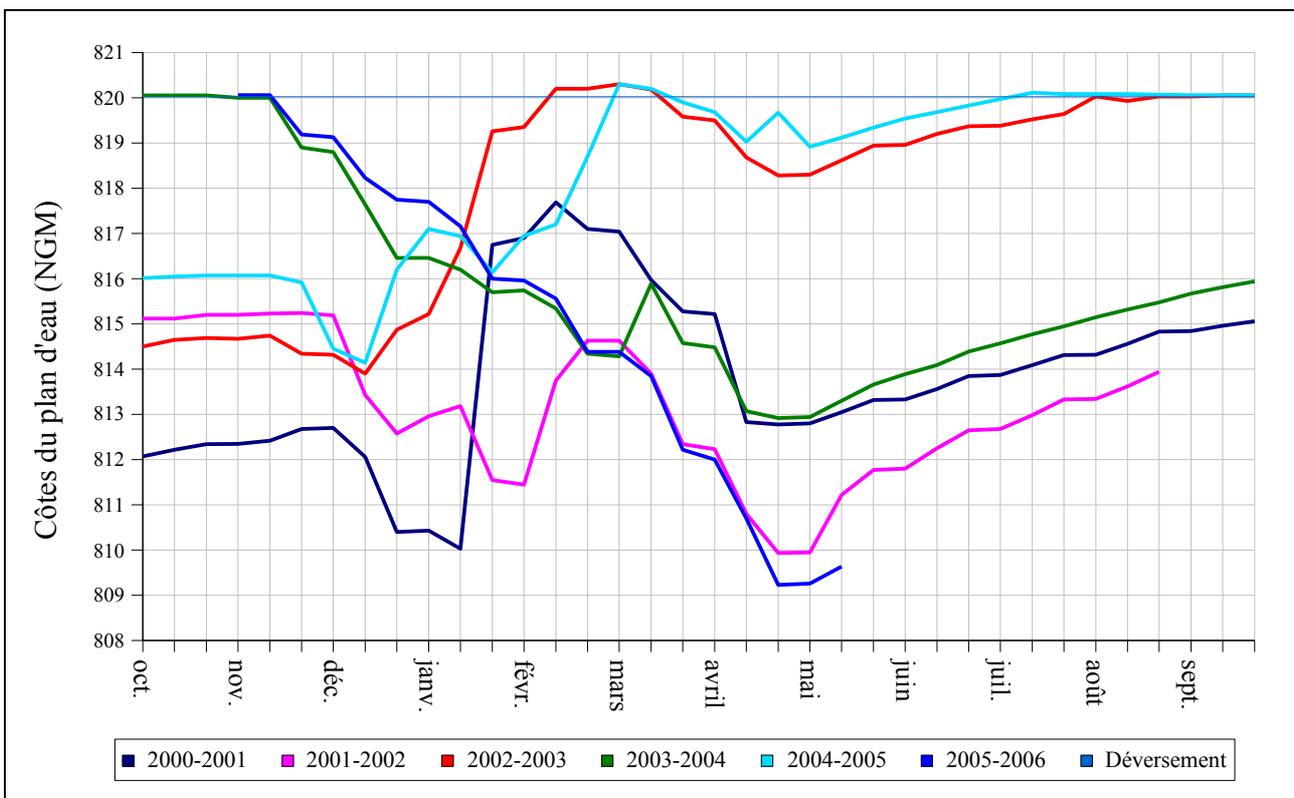


Figure 15 : Évolution de la côte du lac par décennie durant les six campagnes 2000-2001 à 2005-2006

Les déversements ont eu lieu soit de façon assez brève dans la deuxième moitié de la saison des pluies (février 2003 et mars 2005), soit de façon plus durable, à partir de juillet (2005) ou août (2003) jusqu'à novembre (2003 et 2005). Cette durabilité de déversement de 4 à 5 mois, durant la saison réputée sèche, est intéressante du point de vue hydrologique. En effet, elle suppose une continuité des écoulements de rivières³², probablement soutenue par une restitution lente du milieu forestier. La diminution de l'évaporation joue dans le même sens. Enfin, il faut rappeler qu'aucun prélèvement n'intervient plus à partir des mois d'avril ou mai.

Dans le même ordre d'idées, à une période sèche de 1998-99 à 2001-02 inclus (précipitations voisines de 600mm pour les deux premières campagnes) correspond une très forte baisse de la réserve en eau (côte maximale de 815,0 seulement en 2001-2002).

L'ouverture des vannes s'effectue en général entre la mi-novembre ou le tout début du mois de décembre et la fin avril (cela, en relation logique avec le calendrier cultural, annexe 3). Le volume total lâché par campagne est en moyenne de 27,4 Mm³ (tableau 11). Pour la campagne 2003-2004 par exemple, le débit instantané de prélèvement est compris entre 1,5 et 3,4 m³/s (soit un volume lâché journalier de 130 000 à près de 300 000 m³), pendant cinq des six mois où les vannes sont ouvertes.

En règle générale, les prélèvements connaissent deux pointes : d'une part en décembre et janvier (5 à 7 Mm³ par mois) et d'autre part en mars-avril (4 à 7 Mm³). Ces deux maximums sont en relation avec les besoins de la riziculture (préparation de la rizière et mise en eau) et aussi avec les apports pluviaux directs plus ou moins satisfaits.

	Période d'ouverture des vannes	Volume lâché (Mm ³)	Consommation (m ³ /ha)*	Pluie (mm) (oct. à mai)
1993-1994	nov. à mai	18,3	5249	1256,6
1994-1995	oct. à avril	31,18	8941	941
1995-1996	nov. à avril	29,31	8403	1376,7
1996-1997	nov. à avril	32,61	9350	952,1
1997-1998	nov. à avril	33,87	9711	1115,6
1998-1999	nov. à avril	32,62	9352	554,3
1999-2000	nov. à avril	15,58	4468	493,8
2000-2001	déc. à avril	22,76	6525	898,4
2001-2002	nov. à avril	23,82	6829	1109,5
2002-2003	nov. à avril	28,23	8093	1434
2003-2004	nov. à avril	28,38	8136	671,3
2004-2005	nov. à avril	25,38	7276	1325
2005-2006	nov. à avril	34,36	9851	649,5

* surface : 3488 ha

Tableau 11 : Les prélèvements pour irrigation dans la retenue de Bevava

L'étude du fonctionnement du lac de retenue ne portera que sur la période 2000 à 2006 car nous n'avons pas les données pluviométriques journalières correspondantes pour 1993 à 2000.

³²Cette continuité pourra être vérifiée lorsqu'une station hydrométrique sera installée sur la Sasomangana.

2 - Typologie des modalités de remplissage en eau

Les différents cas de figure étudiés ici sont mis en relation avec un certain nombre de connaissances théoriques. Cela nous permet de donner des éléments de réponse quant au fonctionnement de ce « système bassin versant » mais aussi de soulever des questions nouvelles.

Cette typologie met en relation les pluies avec les cotes du plan d'eau et vise à déterminer leur rendement hydrologique ; elle nous permet de distinguer trois types de pluie :

- les premières pluies dites efficaces
- les pluies qui font augmenter la cote du lac de manière « durable »
- les pluies de saison « sèche » et les variations du niveau du lac durant l'intervalle avril-mai à septembre-octobre

Il a fallu trouver des points communs à chacune des campagnes étudiées : en terme de quantité de pluie : pluie moyenne selon la méthode de Thiessen (figure 16), seuil, pluie cumulée, et de caractérisation de celle-ci (intensité, agressivité, spatialisée), et de sa place dans l'année hydrologique. Cela nous a permis de déterminer les facteurs qui font que le lac se remplit ou non.

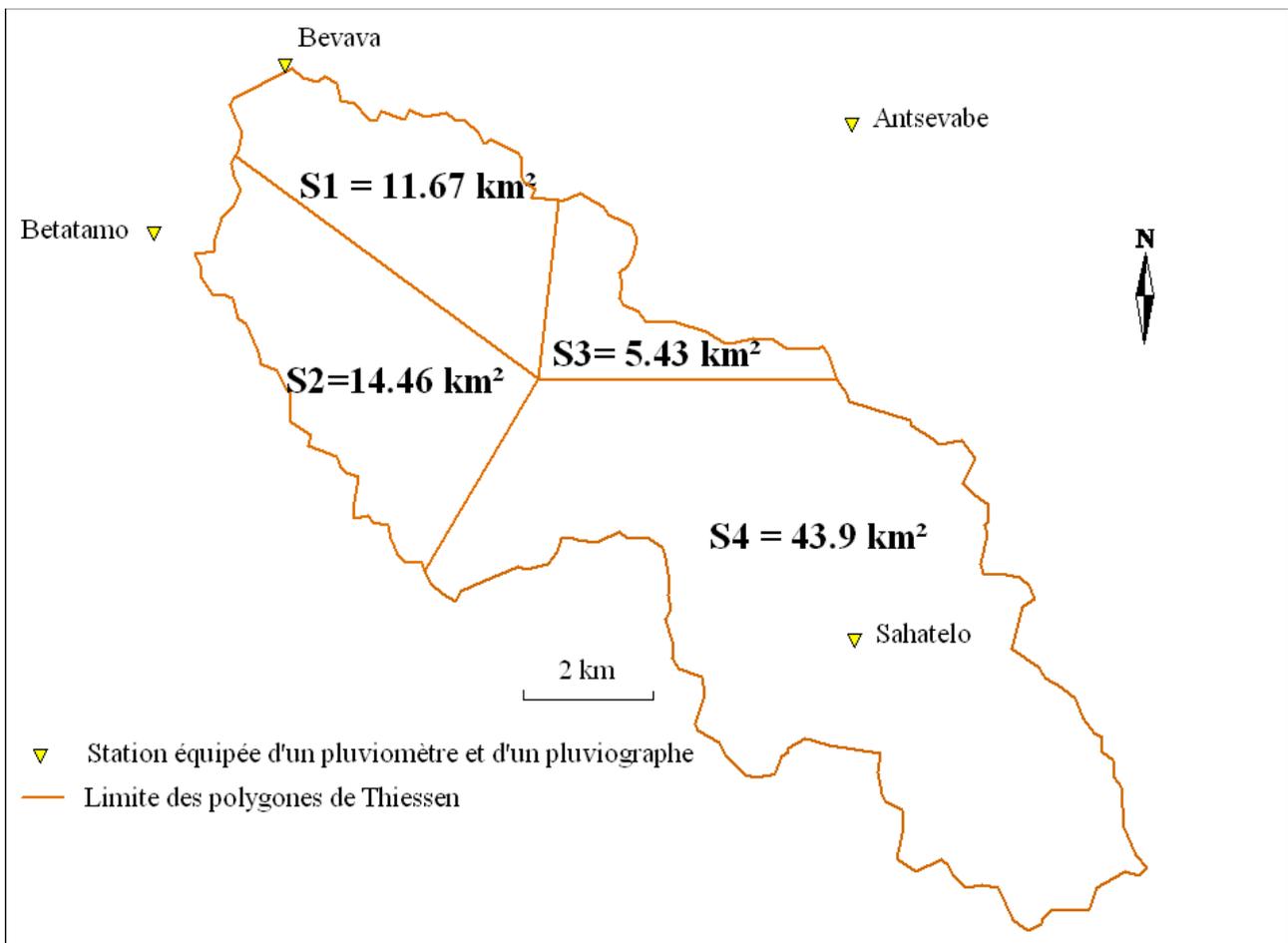


Figure 16 : Polygonation selon la méthode de Thiessen

- Les campagnes caractérisées par un non remplissage du lac

La figure 15 montre que deux des six campagnes nous situent dans ce cas de figure, où le niveau du lac s'abaisse constamment (2003-2004) ou quasi constamment (2005-2006). Une corrélation simple peut déjà être faite à l'évidence avec le total des pluies annuelles correspondant, en 2003-2004 : 677,8 mm et en 2005-2006 : 649,5 mm. En terme d'agressivité, le constat est identique : l'agressivité globale annuelle (Ra) est très faible, comprise entre 77 et 150 points sur les quatre stations, durant la campagne 2003-2004³³. A l'échelle journalière, le même constat est fait : la pluie moyenne la plus élevée est de 66 mm seulement le 2 mars 2004. On peut noter au demeurant que c'est le seul moment durant ces deux campagnes où le niveau du lac se redresse momentanément (figure 15).

Malgré le déficit de pluviosité, les besoins en eau demeurent et les lachers, sans être extrêmes (28Mm3 en 2003-2004), ont un impact manifeste.

- Les campagnes à remplissage « normal »

Les faits étudiés ici sont à mettre en relation avec nos connaissances en terme d'hydrologie de surface.

La place de la pluie dans la saison peut être corrélée à deux facteurs qui agissent de manière contraire, mais que l'on ne connaît pas précisément dans notre cas : d'une part le taux d'humidité préalable du sol, et d'autre part le rôle de la couverture végétale. Nous avons vu dans la première partie que la végétation se répartit de la manière suivante :

- forêt primaire en amont, dont on ne connaît pas exactement, à ce jour, le temps de restitution des eaux de pluie ;

- la savane herbeuse à *Aristida sp.*, cespiteuse en touffes, dont on sait qu'elle ne permet pas de véritablement freiner le ruissellement, même à son stade de développement végétatif maximum, et donc de favoriser l'infiltration.

Ainsi on peut d'ores et déjà affirmer que c'est probablement le taux d'humidité du sol qui jouera un rôle prépondérant dans la dynamique de rendement hydrologique.

Chaque début de campagne a été étudié à l'échelle journalière et selon différents critères :

- la date de la première pluie, dite efficace (au sens de supérieure à 20mm)
- la variation de la côte du lac à cette date
- la pluie moyenne sur le bassin versant, qui peut s'expliquer en terme quantitatif, soit par un événement pluvieux qui aura affecté tout le bassin versant, soit pour une pluie qui ne se distribue que sur une partie du bassin (par exemple plutôt sur l'amont forestier ou inversement...)
- la pluie cumulée sur n jours consécutifs « autour » de la pluie efficace
- la pluie cumulée depuis le début de la campagne (somme des pluies précédant le jour de la première pluie efficace)
- la qualité de la première pluie efficace et des pluies efficaces suivantes : intensité instantanée maximale, intensité au seuil arbitraire de 30 minutes et l'agressivité de cette (ou ces) pluie(s) lorsque ces caractéristiques sont connues.
- enfin les volumes lâchés pour soutenir l'irrigation rizicole.

³³L'agressivité globale annuelle pour 2005-2006 n'est pas encore établie.

- Les premières pluies dites efficaces

Elles se placent en général entre mi-novembre et mi-décembre, le plus souvent isolées dans le temps. Elles entraînent une première élévation temporaire du lac et/ou limitent la baisse du plan d'eau.

Lors de la campagne 2000-2001, une première augmentation de la côte du lac intervient le 18 novembre. C'est la toute première pluie importante sur le bassin versant : la pluie moyenne est ce jour de 38,3 mm. Celle-ci ne s'explique que par une pluie importante à Sahatelo (64 mm le 18 novembre). Mais des pluies supérieures à 20 mm ont eu lieu aussi les 17 novembre (35,6 mm à Bevava et 53,5 mm à Antsevabe) et 19 novembre³⁴ (57,5 à Antsevabe et 23,4mm à Sahatelo). Ainsi les 18,19 et 20 novembre la côte du lac a augmenté de 0,14 m. (soit un volume de 243 600 m³). Ces pluies ont permis un rehaussement du niveau du lac d'autant plus qu'il n'y a pas encore de lachers d'eau à cette période de mi-novembre.

Elle intervient à un moment où le total cumulé des pluies antérieures (depuis le début de la campagne) est inférieur à 50 mm. Le sol est donc loin d'être saturé et on retrouve logiquement des coefficients d'écoulement faible (de l'ordre de 3 à 4% pour l'exemple ci-dessus).

Il faut à présent voir à partir de quand le lac se remplit de manière durable et quelles sont les pluies (facteurs quantitatifs et qualitatifs) qui le permettent.

- Les pluies qui font augmenter la côte du lac de manière « durable »

Le remplissage s'effectue entre mi-décembre et mi-janvier. Pour la campagne 2001-2002, cela est un peu plus tardif (début février) car malgré des pluies relativement abondantes (326 mm en décembre et 200 mm en janvier, les lachers sont restés très importants en janvier (de l'ordre de 200 000 m³ par jour).

Les pluies sont relativement importantes de manière cumulée sur un nombre de jours consécutifs de l'ordre de $n = 10$. Elles peuvent survenir entre la mi-décembre et jusqu'à mi-février (2002-2003).

Lorsque l'on compare ces événements pluvieux à ceux étudiés précédemment et qui ne provoquent pas de remontée brutale du niveau du lac, on peut établir des seuils à partir desquels la côte va augmenter de façon manifeste :

- d'une part un seuil de pluie cumulée depuis le début de la campagne. A ce moment de l'année le total dépasse fréquemment les 250 mm (jusqu'à 801,4 mm de pluie en février 2002, période de remontée du lac la plus tardive).
- d'autre part un seuil au niveau de la pluie unitaire de 40 mm en pluie moyenne sur le bassin versant.

Le coefficient d'écoulement lors de ces épisodes est de l'ordre de 20 à 30%

Un exemple d'augmentation importante du lac étudié jusqu'à l'échelle horaire est détaillé ici (annexe 4 à 7) :

C'est au mois de janvier de la campagne 2000-2001 que le remplissage le plus brutal a eu lieu et cela s'explique par la pluviométrie mensuelle la plus forte toutes campagnes confondues : 483 mm à

³⁴Cet exemple illustre bien toute l'incertitude qui règne au niveau des relevés des pluies journalières... On peut se demander en effet si toutes ces valeurs ne correspondent pas à un seul et même événement pluvieux !

Bevava, 597 mm à Betatamo, 636 mm à Antsevabe et 809 mm à Sahatelo.

Le lac de retenue de Bevava connaît durant ce mois de janvier 2001 une accélération de la vitesse de remplissage à partir du 15 janvier (+7m. durant la deuxième décade, figure 15)

Le limnigramme du 16 au 26 janvier 2001 ainsi que les pluviogrammes correspondants nous fournissent les renseignements suivants :

- Une forte variation de la côte du lac se produit les 15³⁵ et 16 (respectivement +0,92 et +0,77 m). N'ayant pas les données limnimétriques à l'échelle horaire pour la journée du 15, nous nous intéresserons à la seule journée du 16 : cette augmentation commence à partir de 14h, atteint son paroxysme à 20h puis a tendance à s'infléchir. Le remplissage pendant cette période s'effectue à une vitesse moyenne de 0,06 m / h (soit 77 720 m³/h).

- La variation de la côte du plan d'eau correspond à un apport de 2 396 700 m³ entre le 15 et le 17 janvier. Pour connaître le volume d'apport des rivières, il faut ajouter à cela les volumes lâchés ces jours : les vannes ont été fermées le 14 à 18h et réouvrent à 6h le 15 (jusqu'au lendemain, même heure) à un débit de 0,65 m³/s. Cela équivaut à un volume de 51 840 m³ pour les 15 et 16 janvier. Soit un volume écoulé (Ve) de 2 448 540 m³.

Cet événement pluvieux débute le 15 janvier de façon assez généralisée sur le bassin : à Sahatelo, à l'amont, à 12h, à Betatamo et à Bevava à 13h. et 16h. Sur ces trois stations le coeur de la pluie, assimilé à la phase d'intensité maximale, est bien centré dans le temps puisque l'on enregistre 48 mm/h pendant 15 min. à Betatamo (13h - 13h15), 38 mm/h pendant 28 min. à Bevava (16h02 - 16h30), et 30 mm/h pendant 30 min. à Sahatelo (18h30 - 19h). L'évènement pluvieux du 16 janvier débute également de façon concomitante sur les trois stations en début d'après-midi.

Concernant la variation du niveau du lac :

- à l'échelle journalière, on a une variation de 0,10m. le 15 mais de 0,92m. le 16 (en fait à partir de 16h) et de 0,77 le 17.

- à l'échelle horaire on assiste le 16 janvier à un rehaussement accéléré entre 17h et 21h. (0,06 à 0,16 m/h), tandis que le 17 janvier le rehaussement est plus lent mais continu (0,02 à 0,03 m/h)

Chacune de ces deux pluies rend donc bien compte apparemment des deux phases de remplissage. Toutefois les rendements de chacune d'entre elles sont difficiles à dissocier dans un intervalle de temps aussi court et compte tenu de l'incertitude sur le temps de restitution du domaine forestier. De ce fait on calcule ci-dessous un coefficient d'écoulement globalisé, pour l'ensemble de la période 15 et 16 janvier 2001.

- La pluie moyenne du 15 janvier est de 86,8 mm, celle du 16 janvier de 46,2 mm. Sur l'ensemble de ces deux épisodes, on peut calculer le volume précipité (Vp³⁶) et le coefficient d'écoulement (Ke³⁷) suivant deux hypothèses possibles concernant le domaine forestier :

Dans le premier cas, toute la surface du bassin versant est prise en compte ; dans le second, est retirée de la surface totale la surface correspondant à la forêt primaire, dont on ne connaît pas pour l'heure le temps de restitution (probablement assez long) :

-cas n°1 : Vp₁ = 10 108 000 m³ d'où Ke₁ = **24%**

-cas n°2 : Vp₂ = 7 714 000 m³ d'où Ke₂ = **32%**

³⁵ Le limnigramme antérieur au 16 janvier ne nous a pas été transmis, mais nous possédons les côtes du plan d'eau en données journalières (annexe 5)

³⁶ Vp = pluie moyenne x surface du bassin

³⁷ Ke = Ve / Vp ; Ve = 2 448 540 m³

- Les pluies de saison « sèche » et les variations du niveau du lac durant l'intervalle avril-mai à septembre-octobre

Ces variations de saison dite sèche sont toujours positives (figure15). Cela pour différentes raisons : d'une part les lachés pour l'irrigation cessent, d'autre part un écoulement de base caractérise au moins la Sasomangana et enfin l'évaporation sur le plan d'eau est plus faible durant cette période. Si une pluie survient ponctuellement, le volume de crue et donc le rendement de cette averse peuvent être appréciés assez aisément.

Prenons pour exemple la campagne 2001-2002, où la variation a été la plus importante (+4 m. en 4 mois, de mai à août).

Le rehaussement de la retenue en moyenne, avant le fort épisode pluvieux du 10 mai (115,5 mm), est de 0,02 m. par jour, soit un volume de 30 à 40 000 m³. En revanche, au lendemain même de la pluie du mai, le rehaussement s'accélère brutalement pendant deux jours de 0,43 m. le 11 et de 0,42m. le 12, soit en volume 600 000 m³ pour chacune de ces deux journées. Le coefficient d'écoulement peut être encore une fois approché.

Le volume écoulé (Ve) est égal à :

$(600\ 000\ \text{m}^3 \times 2) - (\text{« le débit de base » pendant les deux jours}) = 1\ 200\ 000 - 70\ 000 = 1\ 130\ 000\ \text{m}^3.$

Le volume précipité (Vp) est égal à :

-cas n°1 (domaine forestier compris) : $V_{p1} = 8\ 778\ 000\ \text{m}^3$ d'où **$K_{e1} \approx 13\%$**

-cas n°2 (domaine forestier non compris) : $V_{p2} = 6\ 699\ 000\ \text{m}^3$ d'où **$K_{e2} \approx 17\%$**

III. Bathymétrie du lac, envasement et dégradation spécifique (Mietton, 2005b ; Erismann, 2005)

La bathymétrie (figure 17) a été effectuée durant deux journées sur canot zodiac avec l'aide d'un GPS et d'un échosondeur de précision +/- 5 cm., par houle occasionnellement non négligeable. 948 points ont été levés selon 27 transects transversaux. La densité de points sur ce lac de 2 km² est donc environ de 1 point par maille de 20 m par 100 m.

Ces données nouvelles font écho au relevé topométrique de 2000 (le lac étant à sec) effectué par BRL et à celui, plus ancien, de l'ORSTOM (Ferry et Garreta, 1987). Une autre mesure avait été effectuée par la Someah en 1984 mais elle ne semble pas fiable, par manque de données précises sur les conditions de l'obtention de la courbe de cubature. Cette mesure était nécessaire pour évaluer le remplissage en sédiments de la retenue³⁸.

Le traitement de ces données a été fait avec l'aide du logiciel Surfer. Une courbe de cubature 2005 en a été déduite, mise en comparaison avec celle dressée par l'ORSTOM (figure 18) mais pas avec celle de Someah en 1984 qui paraît trop incertaine. La comparaison de ces deux courbes (à la cote 0 par exemple) permet d'évaluer l'envasement dans l'intervalle de temps de 18 ans. Avec une densité volumique estimée à 1,2 t/m³ la dégradation spécifique sur ce bassin est estimée de l'ordre de 1700 tonnes/km²/an, ce qui est préoccupant, voire très préoccupant, d'autant que ce bassin a été depuis le début des années soixante l'objet d'une politique de protection d'un certain nombre de lavaka (notamment dans la partie aval) et d'une politique de boisements. Cette valeur n'est toutefois pas exceptionnelle puisqu'on retrouve une estimation plus forte encore pour le bassin versant et le barrage de la Sahamaloto (370 km²) au nord-ouest du lac Alaotra : dans un même contexte morphostructural et climatique, on trouve une valeur de 2400 tonnes/km²/an avec $\rho_s = 1,8$ tonnes/m³.

A Bevava, l'examen en cours de cette dynamique nous permettra de mieux saisir les processus qui sont en jeu. Sans représenter un record mondial, ces valeurs de dégradation spécifique sont cependant imposantes. En effet, il faut :

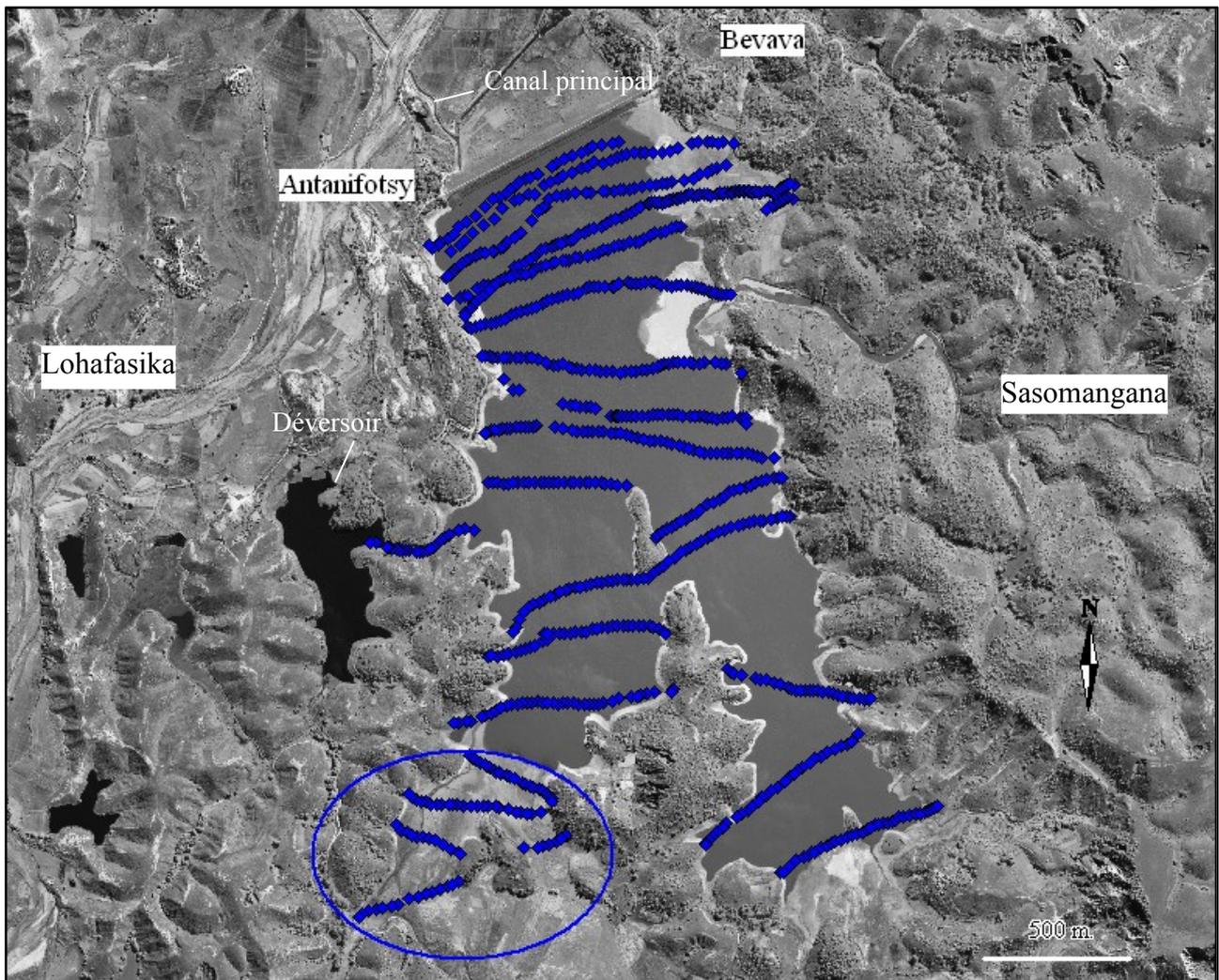
- rappeler que la valeur enregistrée à Bevava se rapporte non pas à l'ensemble du bassin mais à seule la partie située en aval de la forêt pluviale. Si l'on prend en compte cette seule partie aval, l'ordre de grandeur de la dégradation à Bevava est plutôt de l'ordre de 2200 tonnes/km²/an.

- préciser que ce bassin de Bevava a fait l'objet de mesures de restauration et de lutte contre l'érosion, notamment par boisement de lavaka et mise en place d'ouvrages protecteurs, depuis les années soixante jusqu'aux années 80 !

L'agressivité climatique R_{USA} calculée pour les années 1999 à 2004 sur quatre stations du bassin est de l'ordre de 400 à 500 points seulement mais il faut compter avec les accélérations de l'ablation lors des épisodes cycloniques relativement fréquents sur cette façade orientale de l'île.

Le problème de la conservation de ces milieux dans la perspective de protéger le barrage est ainsi posé.

³⁸ Cette sédimentation étant tout à fait visible (et prévisible) lorsque l'on observe le débouché de la Sasomangana où il apparaît un petit delta lacustre.

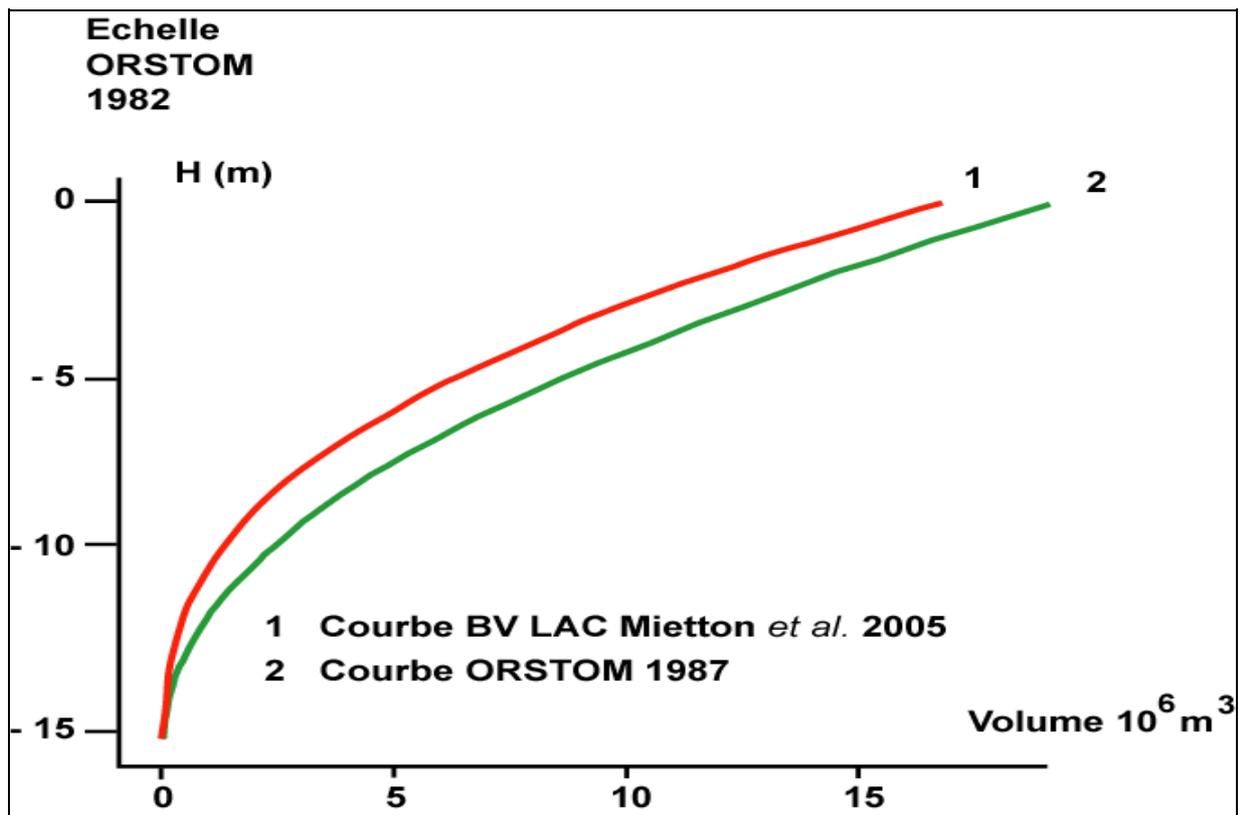


◆ Points GPS

○ Partie en eau à cette date, faible profondeur mais accessible

Auteur : J.Erismann Lyon 3 (Mapinfo) ; Dir. : M.Mietton Lyon 3
 Images Quickbird (mai et juillet 2004, n° 005 et 008, Projet BVLac) et levés de terrain

Figure 17 : Bathymétrie du lac de Bevava 18 et 19 juin 2005



Dégradation spécifique du bassin de Bevava = 1 700 T / km² / an

Dégradation spécifique du bassin de Sahamaloto = 2 400 T / km² / an

Figure 18 : Courbes de cubature du lac de retenue de Bevava

Conclusion

Cette étude du bassin versant, dans le cadre du projet BVLac, aura permis dans un premier temps de mieux le connaître : dans sa composante humaine et d'occupation du sol d'une part (travail de F. Bonnier) et dans sa composante physique et climatique d'autre part.

Cet espace, certes assez réduit, et dont on ne savait que peu de choses, a une grande importance à l'échelle de la cuvette du lac Alaotra notamment en terme de développement et de gestion du territoire : en effet le fonctionnement même de ce bassin versant et du lac de retenue a un impact direct sur les terres en aval, la vallée Marianina et le PC 15 qui comptent 3500 ha de rizières !

De manière plus spécifique, cette étude du bassin versant de Bevava a permis d'avoir une meilleure connaissance du phénomène d'érosion. Même si cela reste à une échelle locale, cela permet d'avoir une base de connaissance (de terrain et de résultats scientifiques) qui pourrait (et devrait) être mise en relation ultérieurement avec la mesure de l'érosion des autres bassins versants du lac Alaotra, et notamment celui de la Sahamaloto, où il existe un barrage et une retenue dont l'envasement a déjà été évalué antérieurement.

Les résultats confirment la gravité du problème d'érosion, tant au niveau de l'envasement du lac que des conséquences qui se répercutent en aval : diminution progressive de la quantité de la ressource eau et aussi (et surtout) ensablement des rizières. Ce problème doit cependant être appréhendé de façon plus globale : en effet la vallée Marianina est également alimentée en eau (et en sédiments) par les deux bassins versants contigus à celui de Bevava : la Lohafasika et l'Harave. Les actions qui seront menées par la suite dans ce projet de gestion des ressources, devront donc tenir compte de cette logique amont-aval d'une part et de celle de l'imbrication d'échelles des différents bassins d'autre part.

BIBLIOGRAPHIE

- Andriamampianina N., 1985, Les lavaka malgaches : leur dynamique érosive et leur stabilisation, *Revue de Géographie*, n° 46, Madagascar, p. 69-85
- Bourgeat F., Petit M., 1965, Les lavaka malgaches : un agent naturel d'évolution des versants, *Bull. Ass. Géogr. fr.*, mars-avril, n° 332-333, p. 29-33
- Bonnier F., 2005, Rapport de fin de mission (juin à août 2005) auprès du projet BVLac, 8p.
- BRL, 2000, Rapport du suivi hydrologique de la campagne 1999-2000 sur les périmètres de la vallée Marianina et du PC 15 dans les vallées du Sud Est du lac Alaotra, 71p.
- Donque G., 1975, Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar. N.I.A.G., Antananarivo, 477p.
- Erismann J., 2005, Rapport de fin de mission (février) auprès du projet BVLac, 14p.
- Ferry L., Garreta P., 1987 : La capacité de la retenue d'Antanifotsy. Études hydrologiques dans la région du lac Alaotra . Fascicule 7/86, 9 p. et courbes
- Helisoa O., 1983 : Les lavaka du socle malgache : distribution, évolution. Thèse Université Paris I. 334 p.
- Hoeblich J.M., 1992, Le lavaka malgache, une forme d'érosion utilisable, *Bulletin du réseau érosion*, n° 12, p. 255-268
- Mietton M., 2005a : Rapport de fin de mission Erosion à Ambatondrazaka (Madagascar) auprès du Projet BV Lac Alaotra. (22 octobre-6 novembre 2004). Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. CIRAD. AFD. 39 p.
- Mietton M., 2005b: Rapport de fin de mission Erosion à Ambatondrazaka (Madagascar) auprès du Projet BV Lac Alaotra. (15-22 juin 2005). Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. CIRAD. AFD. 38 p.
- Ministère de l'agriculture - Unité de politique pour le développement rural (UPDR), Avril 2001, Monographie du moyen est, 258 p.
- Mulder H., Idoe O., 2004, Lavaka the 'hole' story : analyses and design of an integrated bio-physical and socio-economic ESWC management approach to the Lavaka phenomenon in Madagascar, Erosion and Soil and Water Conservation Group (ESW), Wageningen University, 125 p.
- Pernet R., 1953, Influence de la végétation sur l'évolution des sols gneissiques et basaltiques, *Mémoires de l'institut scient. de Madagascar*, Série D - Tome V
- Péguy C., 1970, Précis de climatologie, Masson, Paris, 468 p.

ANNEXE 1 : Indice d'agressivité mensuel par station

1999-2000				
	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
OCTOBRE	0	13	0	0
NOVEMBRE	0	<i>13</i>	0	0
DECEMBRE	0	0	19	8
JANVIER	25	7	115	50
FEVRIER	6	8	10	<i>113</i>
MARS	38	91	82	176
AVRIL	0	0	0	0
MAI	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JULLET	0	0	0	0
AOUT	0	0	0	0
SEPTEMBRE	0	0	0	0

2000-2001				
	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
OCTOBRE	0	0	0	0
NOVEMBRE	0	0	<i>160</i>	0
DECEMBRE	8	28	69	<i>68</i>
JANVIER	68	303	305	526
FEVRIER	<i>85</i>	0	0	0
MARS	95	<i>123</i>	17	19
AVRIL	0	0	0	0
MAI	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JULLET	0	0	0	0
AOUT	0	0	0	0
SEPTEMBRE	0	0	0	0

.

2001-2002				
	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
OCTOBRE	0	5	0	0
NOVEMBRE	0	0	0	0
DECEMBRE	164	<i>170</i>	94	0
JANVIER	24	73	28	<i>224</i>
FEVRIER	<i>54</i>	263	<i>63</i>	467
MARS	0	0	8	5
AVRIL	0	0	29	0
MAI	27	0	0	220
JUN	0	0	0	0
JUILLET	0	0	0	0
AOUT	0	0	0	0
SEPTEMBRE	0	0	0	26

2002-2003				
	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
OCTOBRE	0	0	0	0
NOVEMBRE	22	0	11	<i>107</i>
DECEMBRE	279	<i>254</i>	341	261
JANVIER	<i>151</i>	165	115	78
FEVRIER	104	326	<i>208</i>	45
MARS	38	41	69	0
AVRIL	0	0	0	28
MAI	0	0	0	0
JUN	0	0	0	0
JUILLET	0	0	0	0
AOUT	0	0	0	0
SEPTEMBRE	0	0	0	0

2003-2004				
	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO
OCTOBRE	0	0	0	0
NOVEMBRE	<i>77</i>	<i>52</i>	0	0
DECEMBRE		26	19	0
JANVIER	0	48	47	46
FEVRIER		28	3	26
MARS		0	<i>41</i>	21
AVRIL		0 jusqu'au 18	0	0
MAI		0 à partir du 12	0	0
JUN		0	0	0
JUILLET		0	0	0
AOUT			0	
SEPTEMBRE				

ANNEXE 2 : Indice d'agressivité les plus marquants sur le bassin versant (5 valeurs les plus fortes) - Intensité instantanée maximale - Intensité durée

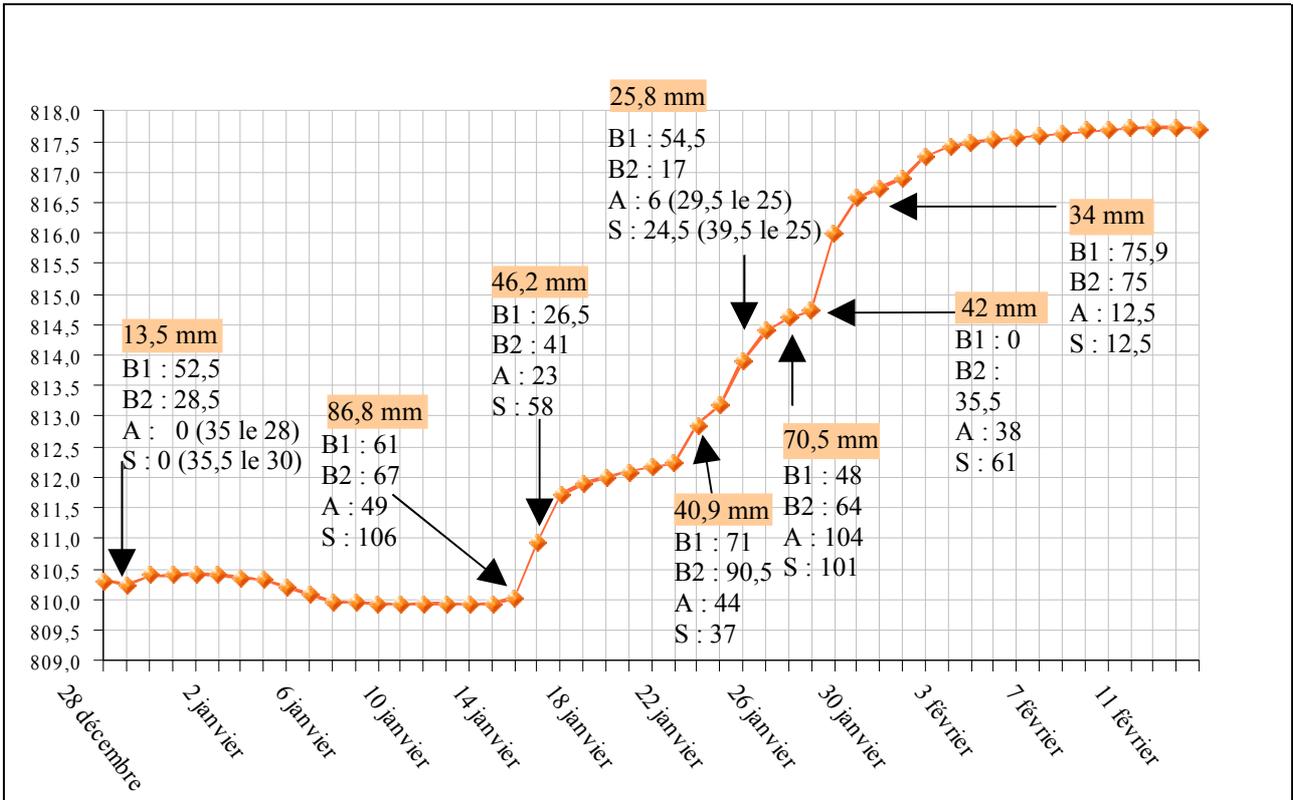
DATES	BETATAMO			BEVAVA			ANTSEVABE			SAHATELO		
	R	I max (mm/h pendant x mn)	Intensité durée (mn par rapport à un seuil de 30mm/h)	R	I max (mm/h pendant x mn)	Intensité durée (mn par rapport à un seuil de 30mm/h)	R	I max (mm/h pendant x mn)	Intensité durée (mn par rapport à un seuil de 30mm/h)	R	I max (mm/h pendant x mn)	Intensité durée (mn par rapport à un seuil de 30mm/h)
1999-2000	01/03 : 91	150 - 2'	47'	01/03 : 38	32,5 - 12'	12'	06/01 : 53	200 - 9'	27'	01/03 : 159	50 - 12'	42'
	12/12 : 13	43 - 18'	18'	20/01 : 21	78 - 18'	18'	21/01 : 52	113 - 9'	54'	01/02 : 70	74 - 42'	42'
	12/01 : 7	22 - 30'	0'	18/02 : 6	50 - 6'	21'	01/03 : 48	40 - 3'	3'	20/01 : 50	94 - 21'	21'
	18/02 : 6	23 - 21'	0'	12/01 : 4	27,5 - 12'	0'	04/03 : 29	40 - 6'	48'	19/02 : 21	90 - 15'	15'
	01/02 : 2	51 - 7'	7'				11/12 : 12	60 - 3'	21'	04/03 : 16	43 - 18'	18'
2000-2001	22/01 : 127	84 - 30'	60'	22/03 : 95	93 - 21'	63'	19/11 : 119	210 - 6'	30'	06/01 : 141	90 - 30'	70'
	22/03 : 123	109 - 30'	30'	01/02 : 85	18 - 18'	66'	21/01 : 74	51 - 24'	66'	29/01 : 69	78 - 30'	30'
	24/01 : 56	70 - 12'	99'	26/01 : 31	45 - 20'	50'	01/12 : 69	190 - 6'	36'	28/01 : 68	50 - 30'	30'
	25/01 : 42	45 - 12'	42'	15/01 : 27	39 - 28'	32'	04/01 : 59	230 - 3'	22'	15/01 : 57	30 - 30'	30'
	15/01 : 21	48 - 15'	15'	16/01 : 8	20 - 9'	0'	08/01 : 44	52,5 - 8'	36'	16/01 : 48	60 - 30'	30'
2001-2002	13/02 : 142	108 - 18'	60'	31/12 : 72	112 - 15'	39'	08/12 : 38	95 - 6'	30'	11/02 : 231	156 - 24'	46'
	31/12 : 81	90 - 16'	63'	06/02 : 43	60 - 28'	28'	31/12 : 29	60 - 3'	39'	12/05 : 220	40 - 6'	119'
	19/02 : 58	65 - 18'	54'	10/05 : 27	19 - 32'	0'	04/01 : 28	66 - 14'	37'	04/01 : 165	108 - 30'	60'
	03/01 : 53	60 - 30'	30'	25/12 : 26,5	44 - 42'	42'	10/05 : 27	25 - 6'	0'	08/02 : 103	141 - 20'	20'
	25/12 : 32	68 - 15'	45'	30/01 : 24	26 - 16'	56'	04/02 : 18	44 - 30'	30'	22/02 : 60	75 - 24'	48'
2002-2003	13/02 : 218	146 - 24'	48'	1/12 : 59	80 - 30'	30'	15/12 : 142	153 - 18'	30'	30/11 : 107	93 - 18'	80'
	01/12 : 85	106 - 20'	44'	13/02 : 53	63 - 33'	33'	13/02 : 135	130 - 12'	56'	15/12 : 63	73 - 23'	55'
	02/12 : 58	66 - 24'	42'	15/12 : 45	52,5 - 8'	53'	27/01 : 70	75 - 2'	89'	14/12 : 55	53 - 45'	45'
	27/01 : 54	76 - 15'	72'	7/12 : 38	48 - 30'	30'	14/02 : 62	140 - 12'	18'	26/12 : 51	38 - 18'	66'
	14/12 : 41	68 - 15'	54'	12/12 : 34	59 - 30'	30'	31/12 : 53	22,5 - 12'	42'	13/12 : 46	95 - 22'	22'
2003-2004	27/11 : 36	55 - 30'	30'	28/11 : 41	110 - 6'	24'	06/03 : 41	60 - 6'	41'	16/01 : 46	105 - 12'	40'
	06/03 : 28	48 - 15'	23'	27/11 : 37	61 - 30'	30'	04/01 : 26	79 - 8'	26'	14/03 : 21	40 - 39'	39'
	06/01 : 27	47 - 39'	39'				29/12 : 18	63 - 18'	18'	11/02 : 8	32,5 - 12'	12'
	03/11 : 16	43 - 21'	21'				06/01 : 8	60 - 3'	9'	07/02 : 5	25 - 12'	0'
	11/12 : 16	38 - 18'	18'									
2004-2005	23/02 : 74	58 - 15'	81'	31/01 : 105	150 - 4'	66'	23/12 : 82	225 - 2'	50'	27/12 : 87	100 - 6'	66'
	31/01 : 53	140 - 6'	24'	19/12 : 59	165 - 2'	46'	19/12 : 75	180 - 3'	44'	27/02 : 78	70 - 6'	72'
	28/02 : 45	53 - 18'	57'	03/02 : 48	105 - 2'	38'	07/03 : 36	73 - 9'	30'	23/12 : 31	110 - 3'	42'
	04/02 : 22	65 - 12'	30'	08/02 : 45	150 - 2'	26'	07/01 : 32	95 - 6'	31'	06/03 : 23	57 - 12'	12'
	08/02 : 17	48 - 18'	30'	04/03 : 35	75 - 2'	44'	27/01 : 26	135 - 2'	12'	28/12 : 15	65 - 6'	17'

N.B : Pour faciliter la lecture et la comparaison des évènements pluvieux entre les stations, chacune des dates est écrite si possible dans 5 styles différents.

ANNEXE 3 : Calendrier culturel à Ambatondrazaka

Cultures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Arachide	p/s/e	e		p/r	p/r						p/s	p/s/e
Haricot de saison	p/s/e	e		r	r							p/s
Haricot de contre-saison						p/s	p/s/e	e	r	r		
Légumes	l	l		r	s/r	p/s/r	p/s/r	p/s/l/r	p/l/r	p/l/r	l	l
Maïs	e			r	r	r					p/s	p/s/e
Manioc						r	r	r	p	p/l	p/l/e	e
Riz de Saison	p/l			r	r	p/r	p/r	p/	p/s	p/s	p/s/l	p/s/l/e
Riz de contre-saison	r			p	p/s	p/s/l	p/l	l/e	e	e	r	r
Voanjobory	e			r	r					p	p/s/e	p/s/e
	Préparation du Sol (p) Semis (s) Plantation ou Repiquage (l)					Entretien des cultures (e) Récolte (r)						

ANNEXE 4 : Exemple d'évolution de la côte du lac en début de saison des pluies à l'échelle journalière (campagne 2000-2001)



- * ■ : Pluie moyenne selon Thiessen (mm)
- B1 : Bevava
- B2 : Betatamo
- A : Antsevabe
- S : Sahatelo

ANNEXE 5 : Tableau correspondant à l'évolution de la côte du lac en début de saison des pluies au pas de temps journalier (campagne 2000-2001)

DATE	COTENGM	DIFFERENTIEL	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO	PLUIES MOYENNES (Thiessen)
23 décembre	810,9	-0,13	1,5	3	10	46,5	28,38
24 décembre	810,79	-0,11					
25 décembre	810,68	-0,11					
26 décembre	810,57	-0,11	0	0	32	0,5	2,58
27 décembre	810,44	-0,13	11,5	17	2,2	19,5	16,42
28 décembre	810,31	-0,13	10	8,5	35	1,5	6,52
29 décembre	810,24	-0,07	52,5	28,5(11h)	0	0	13,48
30 décembre	810,38	0,14	0	0,5	0	35,5 (6h40)	20,6
31 décembre	810,4	0,02					
01 janvier	810,43	0,19					
02 janvier	810,39	-0,04					
03 janvier	810,36	-0,03					
04 janvier	810,32	-0,04	0	0	62(19h-04h)	0	4,43
05 janvier	810,21	-0,11	0	0	13,5	0	1
06 janvier	810,08	-0,13	1	0	41,5(17h-05h)	99,5	60,59
07 janvier	809,96	-0,12	18,5	29(00h-02h)	22(10h-13h & 2h-7h)	29(18h-03h)	26,68
08 janvier	809,95	-0,01	1	0	85(7h-14h & 23h-07h)	0,5	
09 janvier	809,94	-0,01	20	0	28(07h-10h & 23h-07h)	0	5
10 janvier	809,92	-0,02					
11 janvier	809,93	0,01	4,5	2	8,5	41,5	25,65
12 janvier	809,93	0,00	25,5	2,5	6	1,5	5,69
13 janvier	809,92	-0,01	17	25	5,5	18	18,16
14 janvier	809,93	0,01	64	19,5	18,5	39,5	37,68
15 janvier	810,03	0,10	23	67	49	106	81,01
16 janvier	810,95	0,92	3,5	41	12	58	42,7
17 janvier	811,72	0,77	7	6	32,5	4,5	7,14
18 janvier	811,90	0,18	10	20	18,5	13	14,17
19 janvier	812,00	0,10	0	2,5	29	1	3,13
20 janvier	812,10	0,10					
21 janvier	812,17	0,07	6,5	4	60,5	9	11,28
22 janvier	812,23	0,06	84	99	82,5	75	80,95
23 janvier	812,87	0,64	7	18,5	37,5	24	21,14
24 janvier	813,19	0,32	71	90,5	44	37	52,64
25 janvier	813,92	0,73	52	59,5	29,5	39,5	44,23
26 janvier	814,39	0,47	7	17	6	24,5	18,89
27 janvier	814,61	0,22					
28 janvier	814,73	0,12	48	64	104	101	85,32
29 janvier	816,00	1,27	0	35,5	38	61	44,7
30 janvier	816,58	0,58	3,5	41,5	1	7	12,55
31 janvier	816,75	0,17					
01 février	816,90	0,90	76	75	0	12	32,87
02 février	817,25	0,35					

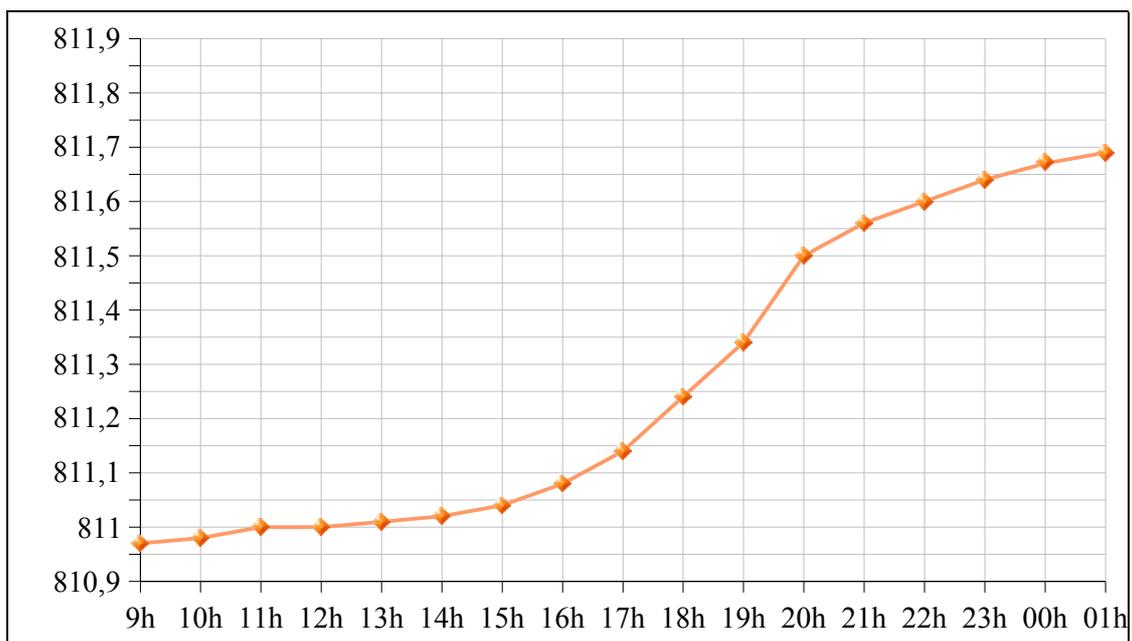
en gras et italique : variations les plus fortes

ANNEXE 6 : Variations de la côte du lac à l'échelle horaire, les 15 et 16 janvier 2001

DATE	HEURE	COTE NGM	DIFFERENTIEL	VOLUME	BEVAVA	BETATAMO	ANTSEVABE	SAHATELO	P _{moy} (Thiessen)
15/janv.	7h				61	67	49	106	86,8
	8h	810,03	0,1	5 590 500			90 (2mn)		
	9h								
	10h								
	11h								
	12h								
	13h						48 (15mn)		
	14h								
	15h							60 (28mn)	
	16h				38 (28mn)				
	17h								
	18h								
	19h								
	20h								
	21h								
	22h								
	23h								
	00h								
	01h								
	02h								
03h						48(28mn)			
04h									
05h									
06h									
16/janv.	07h				26,5	41	12	58	46,2
	8h	810,95		6832500					
	9h	810,97	0,02	6 846 000					
	10h	810,98	0,01	6 859 500					
	11h	811	0,02	6 873 000					
	12h	811	0	6 886 500					
	13h	811,01	0,01	6 901 600			65 (12mn)		
	14h	811,02	0,01	6 916 700				60 (30mn)	
	15h	811,04	0,02	6 931 800					
	16h	811,08	0,04	6 946 900	20 (9mn)				
	17h	811,14	0,06	6 962 000					
	18h	811,24	0,1	6 977 100					
	19h	811,34	0,1	6 992 200					
	20h	811,5	0,16	7 007 300					
	21h	811,56	0,06	7 022 400					
	22h	811,6	0,04	7 037 500					
	23h	811,64	0,04	7 052 600					
00h	811,67	0,03	7 067 700						
01h	811,69	0,02	7 082 800						

événement pluvieux
 variations les plus fortes
 I_{max} mm/h (durée)

ANNEXE 7 : Détail de la variation de la côte du lac le 16 janvier 2001



ANNEXE 8 : Evapotranspiration non corrigée calculée selon la méthode de Thornthwaite

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN
T° moyenne	23,9	23,7	23,6	22,5	20,5	18,7
Indice mensuel TE	10,68	10,55	10,48	9,75	8,47	7,37
Evapotranspiration non corrigée (mm)	130,72	130,19	129,93	127,17	122,6	119,01

	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
T° moyenne	17,9	18,2	19,5	21,3	23,2	23,9
Indice mensuel TE	6,9	7,07	7,85	8,97	10,21	10,68
Evapotranspiration non corrigée (mm)	117,58	118,12	120,55	124,36	128,91	130,72

* $U=1,6(10t/TE)^a$ où t est la température moyenne mensuelle
TE l'indice de Thornthwaite
 $a=0,000000675(TE)^3-0,0000771(TE)^2+0,01792(TE)+0,49239$

ANNEXE 9 : Fiche récapitulative de gestion du barrage

STATION : BEVAVA

MOIS DE : JANVIER

ANNEE : 2002

Date	Côtes plan d'eau NGM	VOLUME emmagasiné (m3)	VOLUME utilisable (m3)	DEBIT lâché m3/s	VOLUME lâché par jour m3	PLUIE (mm)	OBSERVATIONS
1	812,96	10 080 400	7 580 400	0,500	43 200	10,6	
2	812,95	10 063 000	7 563 000	0,500	43 200	1,2	
3	812,96	10 080 400	7 580 400	0,500	43 200	1,8	
4	812,98	10 115 200	7 615 200	0,500	43 200	10,8	
5	813,62	11 266 000	8 766 000	0,500	43 200	48,0	
6	813,80	11 590 000	9 090 000	0,500	43 200	21,1	
7	813,95	11 860 000	9 360 000	0,500	43 200		
8	813,98	11 914 000	9 414 000	0,500	43 200		
9	814,00	11 950 000	9 450 000	3,000	259 200		
10	813,86	11 698 000	9 198 000	3,000	259 200		
11	813,75	11 500 000	9 000 000	3,000	259 200		
12	813,62	11 266 000	8 766 000	3,000	259 200		
13	813,49	11 032 000	8 532 000	3,00 =>3,25	270 000		
14	813,84	11 662 000	9 162 000	3,200	276 480		
15	813,18	10 474 000	7 974 000	3,200	276 480		
16	813,07	10 276 000	7 776 000	3,200	276 480	23,4	
17	812,87	9 923 800	7 423 800	3,200	276 480	6,0	
18	812,82	9 836 800	7 336 800	1,500	129 600		
19	812,75	9 715 000	7 215 000	1,500	129 600		
20	812,69	9 610 600	7 110 600	1,500	129 600		
21	812,62	9 488 800	6 988 800	1,500	129 600		
22	812,56	9 384 400	6 884 400	3,200	276 480		
23	812,40	9 106 000	6 606 000	3,200	276 480		
24	812,30	8 932 000	6 432 000	1,500	129 600	42,7	
25	812,24	8 827 600	6 327 600	1,500	129 600		
26	812,18	8 723 200	6 223 200	2,500	216 000		
27	812,08	8 549 200	6 049 200	2,500	216 000	4,0	
28	811,95	8 334 500	5 834 500	2,500	216 000		
29	811,80	8 108 000	5 608 000	2,500	216 000		
30	811,67	7 911 700	5 411 700	2,500	216 000		
31	811,55	7 730 500	5 230 500	2,500	216 000	29,0	

5 384 880	198,6
-----------	-------

Signature :

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone étudiée.	6
Figure 2 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Bevava.	11
Figure 3 : Le relief du bassin versant de Bevava.	12
Figure 4 : Modèle numérique de terrain du bassin versant de Bevava.	13
Figure 5 : Profil longitudinal de la rivière Sasomangana.	15
Figure 6 : Réseau hydrographique du bassin versant de Bevava.	16
Figure 7 : Occupation du sol du bassin versant de Bevava en 2004.	17
Figure 8 : Les chemins de pâture à proximité du village de Belempona.	18
Figure 9 : Densité de lavaka par km ² dans le bassin versant de Bevava.	20
Figure 10 : Les deux principaux types de lavaka.	21
Figure 11 : Pluviométrie et moyenne mobile 5 points Ambatondrazaka (période de référence 1955 à 2003).	25
Figure 12 : Bilan hydrique à Ambatondrazaka (Donque, 1975).	26
Figure 13 : Situation des bassins contrôlés par un barrage.	28
Figure 14 : Pluviométrie et moyenne mobile 5 points Bevava (période de référence 1963 à 1988)	30
Figure 15 : Evolution de la côte du lac par décade durant les six campagnes 2000-2001 à 2005-2006	40
Figure 16 : Polygonation selon la méthode de Thiessen	42
Figure 17 : Bathymétrie du lac de Bevava - 18 et 19 juin 2005	48
Figure 18 : Courbes de cubature du lac de retenue de Bevava	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition surfacique des classes de pente sur le bassin de Bevava.	9
Tableau 2 : Occupation du sol du bassin versant de Bevava.	17
Tableau 3 : Températures interannuelles moyennes, maximales et minimales (°C) à Ambatondrazaka (période de référence 1971 à 2003)	24
Tableau 4 : Pluviométrie interannuelle moyenne (mm) à Ambatondrazaka - période de référence 1955 à 2003.	24
Tableau 5 : Critique des données pluviométriques mensuelles et annuelles à la station de Bevava.	29
Tableau 6 : Moyenne interannuelle mensuelle à la station de Bevava.	30
Tableau 7 : Données pluviométriques journalières du bassin versant de Bevava.	31
Tableau 8 : Indice d'agressivité annuel par station du bassin selon la méthode de Wischmeier	32
Tableau 9 : Côtes, débits d'entrées et de fuite dans le lac de retenue	38
Tableau 10 : Les prélèvements pour irrigation dans la retenue de Bevava	41

Liste des annexes

Annexe 1 : Indice d'agressivité mensuel par station	52
Annexe 2 : Indice d'agressivité les plus marquants sur le bassin versant (5 valeurs les plus fortes) - Intensité instantanée maximale - Intensité durée	54
Annexe 3 : Calendrier cultural à Ambatondrazaka	55
Annexe 4 : Exemple d'évolution de la côte du lac en début de saison des pluies à l'échelle journalière (campagne 2000-2001).	56
Annexe 5 : Tableau correspondant à l'évolution de la côte du lac en début de saison des pluies au pas de temps journalier (campagne 2000-2001).	57
Annexe 6 : Variations de la côte du lac à l'échelle horaire, les 15 et 16 janvier 2001	58
Annexe 7 : Détail de la variation de la côte du lac le 16 janvier	59
Annexe 8 : Evapotranspiration non corrigée calculée selon la méthode de Thornthwaite	60
Annexe 9 : Fiche récapitulative de gestion du barrage	61

Table des matières

Remerciements	2
Sommaire	3
Introduction	4
Partie 1 : Structure du bassin versant et caractérisation du milieu	7
I. Caractéristiques morphométriques	8
II. Caractéristiques hydrographiques	13
III. Caractéristiques d'occupation du sol	15
- la couverture végétale	15
- les Hommes	18
IV. Caractéristiques géomorphologiques	19
V. Caractérisation climatique	23
1. Le climat régional (station d'Ambatondrazaka)	24
- les températures	24
- les précipitations	24
2. Le climat local du bassin versant de Bevava	27
- les données pluviométriques	27
- les pluies mensuelles	29
- les pluies journalières	31
- la critique des données journalières	31
Partie 2 : Modalités de remplissage en eau et en sédiments du lac de retenue de Bevava ...	35
I. Un bilan hydrologique précis mais ponctuel	37
1. Introduction	37
2. Le bilan hydrologique du 21 au 23 juin 2005	38
- les entrées	38
- les pertes	38
- le résultat	39
II. Relation pluie-débit et typologie	40
1. Les grands traits des variations du plan d'eau à Bevava (2000-2006) ..	40
2. Typologie des modalités de remplissage en eau	42
- Les campagnes caractérisées par un non remplissage du lac ..	43
- Les campagnes à remplissage « normal »	43
III. Bathymétrie du lac, envasement et dégradation spécifique (Mietton,2005b ; Erismann 2005)	47

Conclusion	50
Bibliographie	51
Annexes	51
Liste des figures	62
Liste des tableaux	63
Liste des annexes	64
Table des matières	65