



HAL
open science

**Étude de la ressource en eau et de la station de
production associée : commune urbaine de Fianarantsoa,
Madagascar**

Alix Bouf-Wagner

► **To cite this version:**

Alix Bouf-Wagner. Étude de la ressource en eau et de la station de production associée : commune urbaine de Fianarantsoa, Madagascar. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03551969

HAL Id: dumas-03551969

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03551969v1>

Submitted on 2 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire de fin d'études
Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES
Août 2019

Étude de la ressource en eau de Vatosola et de la
station de production associée
Commune urbaine de Fianarantsoa, Madagascar

Alix BOUF-WAGNER

GRAND LYON
la métropole



 **ENGEES**
ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la coopération décentralisée entre la
région Haute Masiatra et la Métropole de Lyon (Programme EAURIZON)



EAURIZON

Remerciements

Je tiens à témoigner ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans le bon déroulement de mon stage et dans la réalisation de ce mémoire.

François Simon, responsable de la coopération à Fianarantsoa et mon tuteur de stage, pour ses conseils avisés et le temps qu'il m'a consacré, et Karine Blanc, responsable de la coopération à Lyon, pour m'avoir offert cette opportunité.

Jean-Bernard Bardiaux, pour sa disponibilité, ainsi que tous les autres professeurs de l'ENGEES ayant répondu à mes mails lorsque j'avais des questions.

Menja et Tantely, agents de la JIRAMA, pour l'aide qu'ils m'ont fournie et pour leur disponibilité.

Toute l'équipe du programme Eaurizon, pour leur accueil et leur bonne humeur.

Dominique Weckner et Manon Desmurs, pour avoir partagé cette expérience avec moi, et pour avoir chassé cafards, papillons de nuit et autres indésirables à mes côtés.

Ce mémoire clôture trois années passées à l'ENGEES, j'aimerais donc remercier toutes les personnes qui ont rendu ces années inoubliables, particulièrement la promotion Grand Lyon (une grande famille), et je ne peux m'empêcher d'avoir une pensée spéciale pour la Space xxl, plus qu'une coloc, un état d'esprit.

Finalement, merci à mes parents et à ma sœur pour leur soutien qui m'a permis de réaliser les études que je voulais.

Résumé

Étude de la ressource en eau de Vatosola et de la station de production associée Commune urbaine de Fianarantsoa, Madagascar

La Région Haute Matsiatra et la Métropole de Lyon sont en coopération décentralisée depuis 2006. Le projet actuel, Eaurizon, cible 15 communes de la région pour un appui sur le secteur de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène (EAH). Dans le cadre de ce programme, plusieurs études ont déjà été menées sur le réseau d'eau potable de Fianarantsoa, chef-lieu de la région. Ce réseau, géré sous contrat de concession par la JIRAMA, est desservi par trois stations, dont Vatosola.

La ressource en eau de Vatosola représente 22% de la production totale, soit en moyenne 1 700 m³/j. Elle est constituée de six petits barrages, créant six lacs artificiels, répartis sur trois bassins versants d'une surface totale de 251 ha. Le volume de stockage des lacs a été estimé à 24 800 m³. La station de production est située à côté des barrages et dessert ensuite la ville en gravitaire. La JIRAMA souhaite aujourd'hui augmenter sa production journalière et la stabiliser au cours du temps.

Il s'agit dans ce rapport de faire le point sur la ressource de Vatosola d'un point de vue quantitatif afin de connaître les limites de production journalière du site. Cette étude prend en compte la quantité d'eau disponible sur les bassins versants, le volume de stockage et le dimensionnement de la station.

L'étude de la ressource en eau de Vatosola et de la station de production associée a permis de conclure qu'il n'est pas possible d'augmenter la production journalière du site (ressource limitante).

Abstract

Study of the water resource of Vatosola and of the associated treatment plant Urban municipality of Fianarantsoa, Madagascar

The Haute Matsiatra region and the city of Lyon are engaged in a decentralized cooperation since 2006. The current project, Eaurizon, assists 15 municipalities of the region in the Water, Sanitation and Hygiene (WASH) sector. Under this program, several studies on the drinking water system of Fianarantsoa, capital of the region, have already been carried out. This water system, run under a concession contract by the JIRAMA, is served by three treatment plants, one of which is Vatosola.

The water resource of Vatosola accounts for 22% of total production, namely 1700 m³/j on average. It includes six small dams, creating six artificial lakes, located on three different watersheds for a total area of 251 ha. The storage volume of lakes is estimated at 24 800 m³. The water treatment plant is located next to the dams and serves the city using gravity transfer. The JIRAMA would like to increase its daily production and stabilize it over time.

The purpose of this report is to evaluate the water resource of Vatosola from a quantitative point of view in order to know the site's daily production limits. This study considers the amount of water available on the watersheds, the storage volume and the dimensioning of the treatment plant.

The study of the water resource of Vatosola and of the associated treatment plant revealed that it is not possible to increase the site's daily production (the resource is limiting).

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
RESUME	4
ABSTRACT	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES ABREVIATIONS	8
1. INTRODUCTION	9
2. PRESENTATION GENERALE ET CONTEXTE DE L'ETUDE	10
2.1. LE CONTEXTE MALGACHE	10
2.2. LA COOPERATION DECENTRALISEE.....	10
2.3. LE RESEAU D'EAU DE LA COMMUNE URBAINE DE FIANARANTSOA	10
2.4. HISTORIQUE DES ETUDES REALISEES	11
2.5. OBJECTIFS ET ATTENDUS DE L'ETUDE	12
3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
3.1. VUE D'ENSEMBLE DES BASSINS VERSANTS.....	13
3.2. PRESENTATION DES LACS ET DES BARRAGES	15
3.3. PRESENTATION DE LA STATION DE PRODUCTION	22
4. DONNEES DE L'ETUDE	31
4.1. DONNEES DISPONIBLES.....	31
4.2. DONNEES ESTIMEES	32
4.3. DONNEES MESUREES	34
5. DEFINITION DE LA METHODOLOGIE	37
5.1. QUANTITE D'EAU DISPONIBLE	37
5.2. STOCKAGE	38
5.3. STATION DE PRODUCTION	40
6. RESULTATS	41
6.1. QUANTITE D'EAU DISPONIBLE	41
6.2. STOCKAGE	45
6.3. STATION DE PRODUCTION	49
7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	52
8. BIBLIOGRAPHIE	54
9. ANNEXES	55
9.1. ANNEXE 1	55
9.2. ANNEXE 2	55
9.3. ANNEXE 3	56
9.4. ANNEXE 4	57

Liste des figures

Figure 1: Schéma synoptique du réseau d'eau potable de Fianarantsoa [2]	11
Figure 2: Bassins versants de Vatosola obtenus grâce à l'extension GRASS de QGis.....	13
Figure 3 : Carte d'occupation du sol des bassins 1, 2 et 3	14
Figure 4: Graphique d'occupation du sol des bassins 1, 2 et 3.....	15
Figure 5: Enchaînement des lacs de Vatosola	16
Figure 6: Lac et barrage 1	17
Figure 7: Déversoir du barrage 1 (à gauche), fin du canal (à droite)	17
Figure 8: Barrage et lac 2	18
Figure 9: Canaux d'alimentation du lac 3.....	18
Figure 10: Barrage et lac 3	19
Figure 11: Reste du canal de trop plein (à l'aval du barrage 3).....	19
Figure 12: Trop-plein du barrage 3.....	20
Figure 13: Barrage 4.....	20
Figure 14: Fuites du barrage 4	20
Figure 15: Barrage 5.....	21
Figure 16: Barrage 6.....	21
Figure 17: Fuites du barrage 6	22
Figure 18: Fuites du barrage 6 (aval du barrage).....	22
Figure 19: Photo de la station de Vatosola	22
Figure 20 : Schéma synoptique de la filière de traitement.....	23
Figure 21: Plan de la chambre d'injection	24
Figure 22: Ouvrage de coagulation	25
Figure 23: Flocculateurs.....	25
Figure 24: Décanteur 1.....	26
Figure 25: Début du décanteur 1.....	26
Figure 26: Décanteur 2	27
Figure 27: Filtres à sable	28
Figure 28: Filtre 1 vide.....	28
Figure 29: Plancher du filtre	28
Figure 30: Plan de la chambre de désinfection	29
Figure 31: Schéma de coupe d'un filtre	36
Figure 32: Bilan hydrologique simplifié des bassins versants de Vatosola.....	37
Figure 33: Bassins versants modifiés.....	38
Figure 34: Bilan hydrologique des lacs de Vatosola	39
Figure 35 : Bilan hydrologique d'une année moyenne avec un prélèvement journalier de 1 700 m ³ /j.....	41
Figure 36: Bilan hydrologique du BV1 d'une année moyenne avec un prélèvement journalier de 1 700 m ³ /j	42
Figure 37: Bilan hydrologique des BV1 et BV2 d'une année moyenne avec un prélèvement de 1 700 m ³ /j	43
Figure 38: Bilan hydrologique des BV1 et BV3 d'une année moyenne avec un prélèvement de 1 700 m ³ /j	44
Figure 39: Bilan hydrologique des lacs, moyennes journalières (m ³ /j) entre le 8 et 20 mai 2019.....	46
Figure 40: Carte altimétrique des bassins versants de Vatosola obtenue grâce au module QGis « qgis2threejs »	55
Figure 41: Coefficient cultural pour différent stade de croissance de différentes cultures, source : FAO	55
Figure 42: Résultat de l'interpolation des mesures sous QGis.....	56

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des bassins versants	13
Tableau 2: Surface des lacs et niveau d'eau en mars 2019.....	16
Tableau 3: Caractéristiques des conduites entre les barrages et la station.....	23
Tableau 4: Statistiques pluviométriques annuelles et sécheresses de temps de retour 5 à 100 ans	31
Tableau 5: Evolution de la production à Vatosola entre 2013 et 2018	32
Tableau 6: Coefficient cultural pour chaque type d'occupation du sol et chaque mois	33
Tableau 7: Kc mensuel pour les bassins versants de Vatosola	33
Tableau 8: Résultats de la bathymétrie.....	34
Tableau 9: Résumé des possibilités de mesure des fuites et déversements.....	35
Tableau 10: Caractéristiques des bacs de préparation des réactifs de prétraitement.....	35
Tableau 11: Caractéristiques des ouvrages de coagulation, floculation et décantation.....	35
Tableau 12: Caractéristiques des bacs de préparation des réactifs de désinfection et neutralisation	36
Tableau 13: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 0).....	42
Tableau 14: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 1).....	43
Tableau 15: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 2).....	44
Tableau 16: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 3).....	45
Tableau 17: Récapitulatif des résultats pour chaque scénario.....	45
Tableau 18: Eau disponible pour une année moyenne, sur les trois bassins versants.....	47
Tableau 19: Comparaison de l'eau disponible avec les prélèvements journaliers pour une année moyenne et une production journalière de 2500 m ³ /j sur les trois bassins versants	47
Tableau 20: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 0).....	48
Tableau 21: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 1).....	48
Tableau 22: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 2).....	49
Tableau 23: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 3).....	49
Tableau 24: Autonomie des bacs de préparation des réactifs	50
Tableau 25: Production journalière max pour la coagulation et la floculation.....	50
Tableau 26: Production journalière max des décanteurs.....	50
Tableau 27: Autonomie des bacs de préparation des réactifs	51
Tableau 28: Récapitulatif des résultats pour chaque scénario.....	53
Tableau 29: Résultats de la campagne de mesure effectuée du 8 au 20 mai 201	57

Liste des abréviations

BV	Bassin versant
CTGREF	Centre technique du génie rural des eaux et des forêts
EAH	Eau, assainissement et hygiène
ES	Ecoulements souterrains
ETo	Evapotranspiration de référence
ETR	Evapotranspiration réelle
EV	Evaporation en eau libre
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
JIRAMA	Jiro sy Rano Malagasy
MEEH	Ministère de l'Énergie, de l'Eau et des Hydrocarbures
ONU	Organisation des Nations Unies
P_{BV}	Précipitations sur le bassin versant
P_{LAC}	Précipitations sur le lac
QA	Débit annuel
Q_D	Débit des fuites et déversements
QM	Débit mensuel
Q_P	Débit prélevé
R	Ruissellements
S	Surface
Zm	Altitude moyenne

1. Introduction

A Madagascar, l'accès à l'eau potable est très limité. Bien que le Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH) annonce un taux d'accès à l'eau potable en 2016 de 50%, avec 7% en branchements privés et 43% en branchements publics [1], ce chiffre semble très optimiste. En plus d'un mauvais accès à l'eau potable, il existe des disparités entre les régions et entre les zones rurales et urbaines. Les infrastructures existantes sont souvent mal gérées et finissent par ne plus fonctionner [1].

Afin d'améliorer et de pérenniser l'accès à l'eau potable, la Région Haute Matsiatra et la Métropole de Lyon sont en coopération décentralisée depuis 2006. Le projet actuel, Eaurizon, cible 15 communes de la Région, dont la commune urbaine de Fianarantsoa, pour un appui sur le secteur de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène (EAH).

A Fianarantsoa, chef-lieu de la région Haute-Matsiatra, 70% des 200 000 habitants ont accès à l'eau potable. Le réseau d'eau de la ville est géré, sous contrat de concession, par la Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA). La JIRAMA est la compagnie nationale d'eau et d'électricité de Madagascar. Le réseau est desservi par trois stations de production, la station de Tombana, alimentée par le lac d'Antarambiby fourni 61% de la production totale, la station d'Ambanimaso, alimentée par la station de pompage d'Ankidona 17%, et la station de Vatosola, alimentée par les lacs du même nom, 22% [2]. A l'origine, le pompage d'Ankidona devait être utilisé seulement en période d'étiage lors de sécheresse, aujourd'hui il fonctionne en permanence. Ce pompage représente des coûts élevés pour la JIRAMA qui souhaiterait réduire considérablement son utilisation, voir l'arrêter.

Après avoir étudié les possibilités d'augmentation des prélèvements au lac d'Antarambiby en 2018 [3], la JIRAMA s'est penchée sur le site de Vatosola. Ne disposant pas des ressources nécessaires pour mener cette étude à bien, la JIRAMA a fait appel au programme Eaurizon.

Ce rapport présente l'étude de la ressource en eau de Vatosola et de la station de production associée, d'un point de vue quantitatif, en évoquant séparément la quantité d'eau disponible, la capacité de stockage et le dimensionnement de la station. Le rapport présente les différentes étapes de l'étude :

- ◆ Le contexte, les objectifs et les attendus de l'étude,
- ◆ La zone d'étude,
- ◆ Les données disponibles, estimées et mesurées,
- ◆ La méthodologie mise en œuvre,
- ◆ Les résultats obtenus et conclusions.

2. Présentation générale et contexte de l'étude

2.1. Le contexte malgache

Madagascar est une île plus grande que la France métropolitaine située dans l'océan Indien, au large du Mozambique.

Après une répression sanglante de l'insurrection de mars 1947 par l'armée française, entre une dizaine de milliers et 89 000 morts selon les sources, la république de Madagascar obtient son indépendance en 1960, mettant fin à 65 ans de colonisation.

Madagascar fait partie de la liste des pays les moins avancés de l'Organisation de Nations Unies (ONU). Les taux d'accès à l'eau potable et à l'assainissement sont très faibles, estimés respectivement à 50% et à 35% [1]. Ces chiffres ne témoignent pas d'un manque de volonté mais d'un manque de ressources financières, matériels et humaines.

Le manque d'accès à l'eau potable et à l'assainissement impacte le développement et l'économie du pays, par les maladies et donc l'absentéisme et les dépenses de santé qu'il engendre.

2.2. La coopération décentralisée

La Région Haute Matsiatra, située sur les hauts plateaux de Madagascar, et la Métropole de Lyon sont en coopération décentralisée depuis 2006. Le programme Eaurizon, mis en place depuis mars 2016, cible 15 communes de la Région pour un appui sur le secteur de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène (EAH). Les axes d'intervention de la coopération sont :

- ◆ Renforcer la gouvernance des collectivités locales sur le secteur EAH
- ◆ Développer l'accès à l'eau potable
- ◆ Développer l'accès à l'assainissement et accompagner les populations dans l'amélioration de leurs pratiques liées à l'hygiène
- ◆ Préserver et partager les ressources en eau entre les différents usages
- ◆ Former et professionnaliser les acteurs du secteur
- ◆ Capitaliser et diffuser les outils et méthodes produits par le projet

Plusieurs acteurs sont mobilisés pour faire de ce programme une réussite. En France, la Métropole de Lyon et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse se mobilisent fortement avec SAUR Solidarités. Côté Malgache, le Ministère de l'Energie, de l'Eau et des Hydrocarbures, la Région et les communes sont engagés sur différents apports financiers et sur la pérennisation d'un service public accessible, efficace et pérenne [1].

2.3. Le réseau d'eau de la commune urbaine de Fianarantsoa

La commune urbaine de Fianarantsoa est le chef-lieu de la région, son réseau d'eau dessert environ 150 000 usagers, soit 70% de la population de la ville. Ces usagers sont connectés au réseau soit par des branchements privés, soit par des points d'eau collectifs (bornes fontaines). Le réseau d'eau de la ville de Fianarantsoa est géré, sous contrat de concession, par la Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA). La JIRAMA est la compagnie nationale d'eau et d'électricité de Madagascar.

Le réseau d'eau de la ville de Fianarantsoa est desservi par 3 stations de traitement alimentées par 8 sources. La plus ancienne, la station de Vatosola, est alimentée en gravitaire par les lacs de Vatosola. La station de Tombana est alimentée en gravitaire par le lac d'Antarambiby, et la station

d'Ambanimaso est alimentée par la station de pompage Ankidona, qui capte les eaux superficielles de la rivière Mandranofotsy.

L'eau traitée produite est en moyenne de 8 060 m³/jour, dont 61% provenant de la station de Tombana, 22% par la station de Vatosola et 17% par la station d'Ambanimaso [2].

La capacité de stockage du réseau est de 2150 m³, et est divisée sur 5 réservoirs répartis le long de la ville. Le schéma synoptique du réseau est présenté ci-dessous.

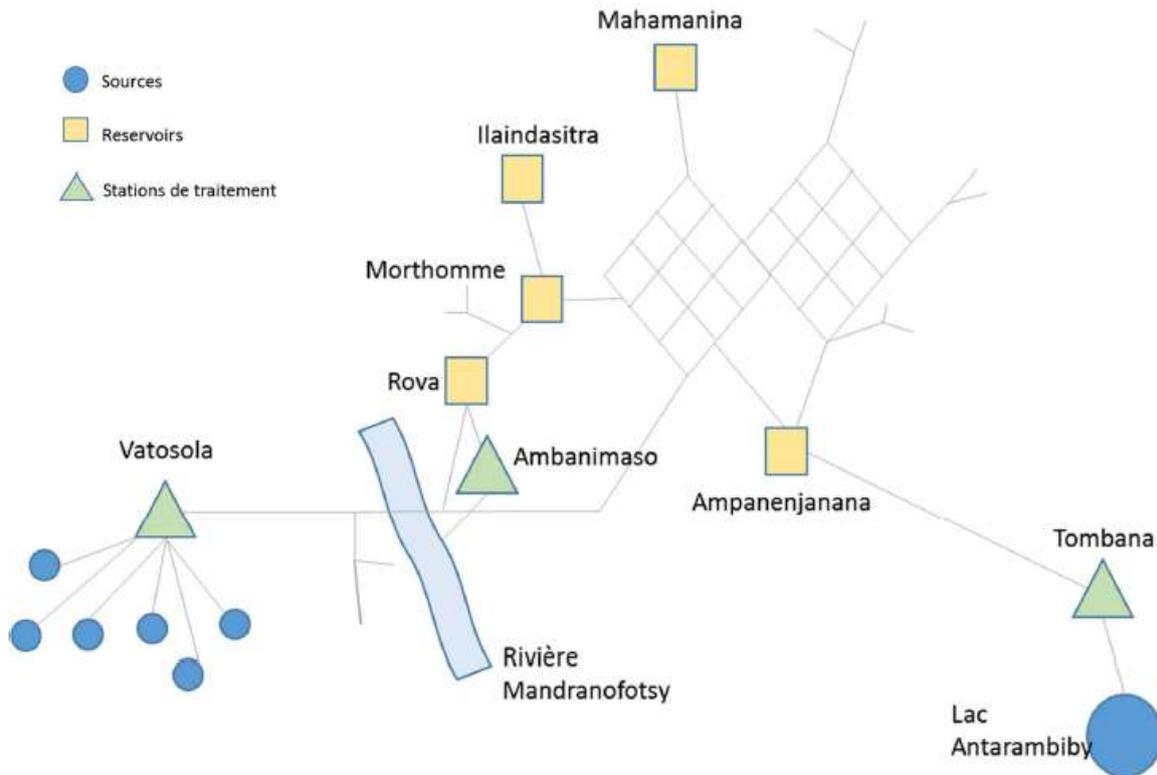


Figure 1: Schéma synoptique du réseau d'eau potable de Fianarantsoa [2]

Le réseau est vétuste, il date en grande partie des années 50. Le rendement global du réseau d'environ 69%.

2.4. Historique des études réalisées

En 2015 et 2016, le comportement du réseau d'eau de Fianarantsoa a été modélisé afin d'identifier les travaux de renforcement à réaliser pour améliorer le fonctionnement de la distribution d'eau. Dans le cadre de ces études, un diagnostic sommaire a également été produit sur la ressource en eau et les stations de production. Ces études ont mené à la rédaction du schéma directeur eau potable de Fianarantsoa en 2017 [2]. La modélisation et les recommandations sur l'amélioration de la distribution qui ont été formulées ont abouti à la réalisation de travaux en 2018 financés dans le cadre du programme Eaurizon.

En 2018, il a également été réalisé une étude sur la ressource en eau d'Antarambiby et la station de production associée de Tombana [3]. Cette étude a été réalisée par Damien Dubois, élève ingénieur de l'ENSEGID de Bordeaux. En parallèle de cette étude, le diagnostic de la station de Tombana a été complété par une mission d'expertise d'un agent de la SAUR [4], partenaire du programme.

2.5. Objectifs et attendus de l'étude

L'objectif de l'étude est de faire le point sur la ressource en eau et la station de production de Vatosola d'un point de vue quantitatif. La JIRAMA souhaiterait réduire les prélèvements à Ankidona (la station de pompage présente des coûts élevés) et les augmenter à Vatosola, et vise une production journalière stable dans le temps.

La finalité est de faire des recommandations sur la gestion de la ressource en eau et de la station de production de Vatosola en proposant différents scénarios.

3. Présentation de la zone d'étude

3.1. Vue d'ensemble des bassins versants

3.1.1. Présentation des bassins versants

Le site de captage de Vatosola est situé à 3km au sud-ouest de Fianarantsoa. Les 6 barrages en béton définissent les exutoires de 6 bassins versants (BV) (voir Figure 2). Les BV 4, 5 et 6 sont des sous-bassins du BV 1.

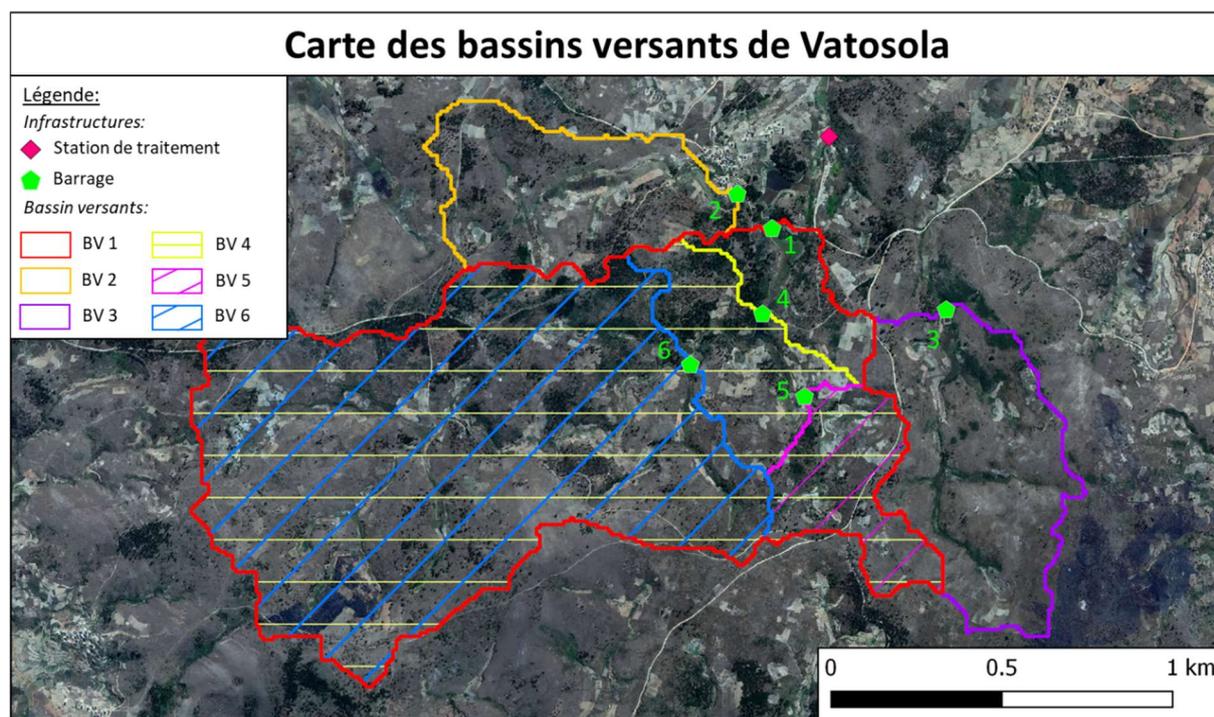


Figure 2: Bassins versants de Vatosola obtenus grâce à l'extension GRASS de QGIS

Les bassins versants sont situés à des altitudes comprises entre 1340 et 1479m, avec une moyenne de 1396m. La carte altimétrique des bassins versants est disponible en Annexe 1, p55. Il y a une différence d'altitude de plus de 230m entre Fianarantsoa (1110m en moyenne) et le site de captage. Les caractéristiques de chaque bassin versant sont disponibles ci-dessous.

Tableau 1: Caractéristiques des bassins versants

	Surface (ha)	Altitude Moyenne (m)	Altitude Min (m)	Altitude Max (m)
BV1	179	1 396	1 340	1 471
BV2	32	1 382	1 351	1 426
BV3	40	1 411	1 362	1 479
BV4	168	1 398	1 346	1 471
BV5	18	1 388	1 357	1 442
BV6	131	1 404	1 355	1 471

3.1.2. Contexte géologique et hydrogéologique

La zone d'étude est située sur les hauts-plateaux de Madagascar qui reposent sur un socle cristallin. Plus précisément, les bassins versants de Vatosola sont localisés sur un massif granitique [5] et [6]. Le granite est imperméable en tant que roche mais perméable en tant que formation dû à de potentiels réseaux de fissures (d'origine thermique) et/ou de diaclases (d'origine tectonique) qui le découpent. Ce massif peut donc être considéré comme massif granitique à fort résidu d'altération.

Il existe deux grandes familles de nappes, les nappes libres, ou nappes phréatiques, et les nappes captives. La nappe libre est connectée à tout ce qui se passe en surface et varie librement. La nappe captive, en général plus profonde, est surmontée par une formation imperméable ou peu perméable et est maintenue sous pression.

A Madagascar, l'essentiel du débit des rivières provient du ruissellement de surface, complété par le drainage des couches d'altération. La proportion du débit provenant des nappes profondes est généralement assez faible, sauf cas particuliers de plateaux calcaires très fissurés et de zones volcaniques perméables [7].

A Vatosola, le manque de données ne permet pas de conclure sur la présence ou non d'une nappe captive. Dans la suite de l'étude, seule la nappe libre sera considérée.

3.1.3. Occupation du sol

L'occupation du sol de la zone d'étude a été déterminée par photo-interprétation. Une carte d'occupation des sols a été réalisée sur le logiciel QGis avec une image satellite datant de septembre 2017. Huit types d'occupation du sol ont été différenciés.

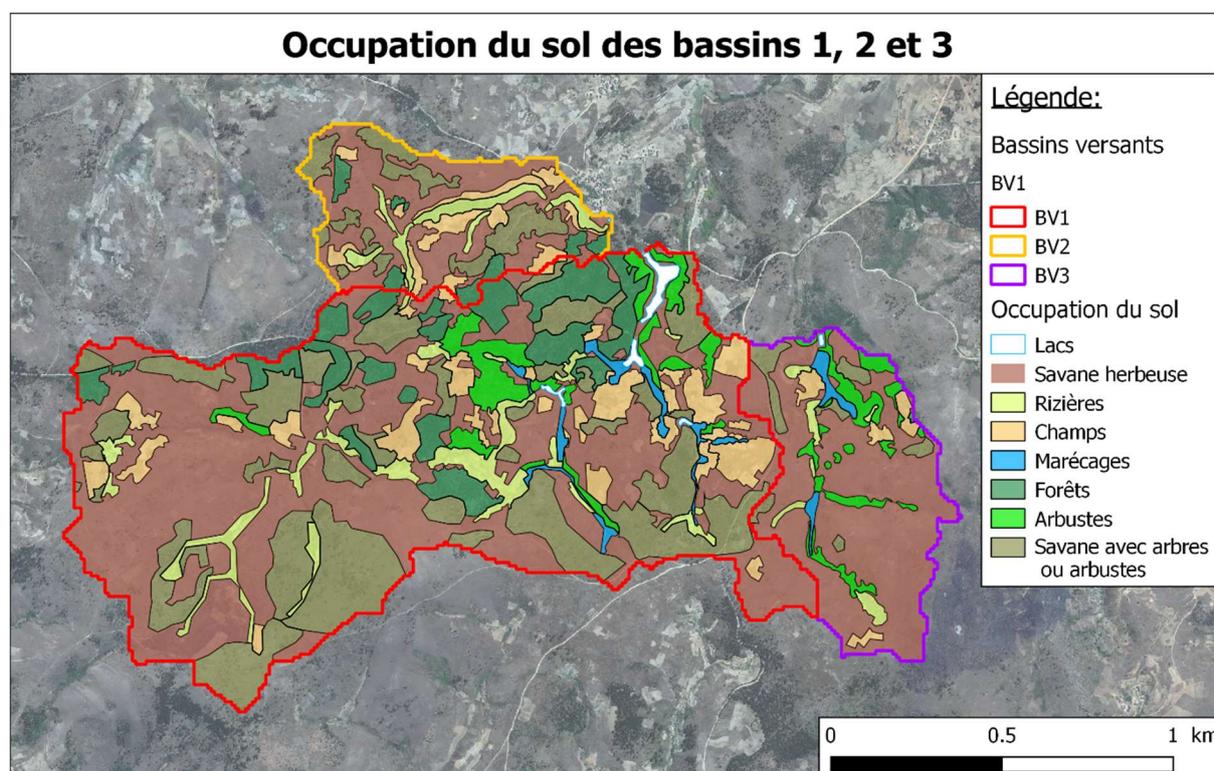


Figure 3 : Carte d'occupation du sol des bassins 1, 2 et 3

Le graphique ci-dessous présente les surfaces et les pourcentages de chaque classe d'occupation du sol.

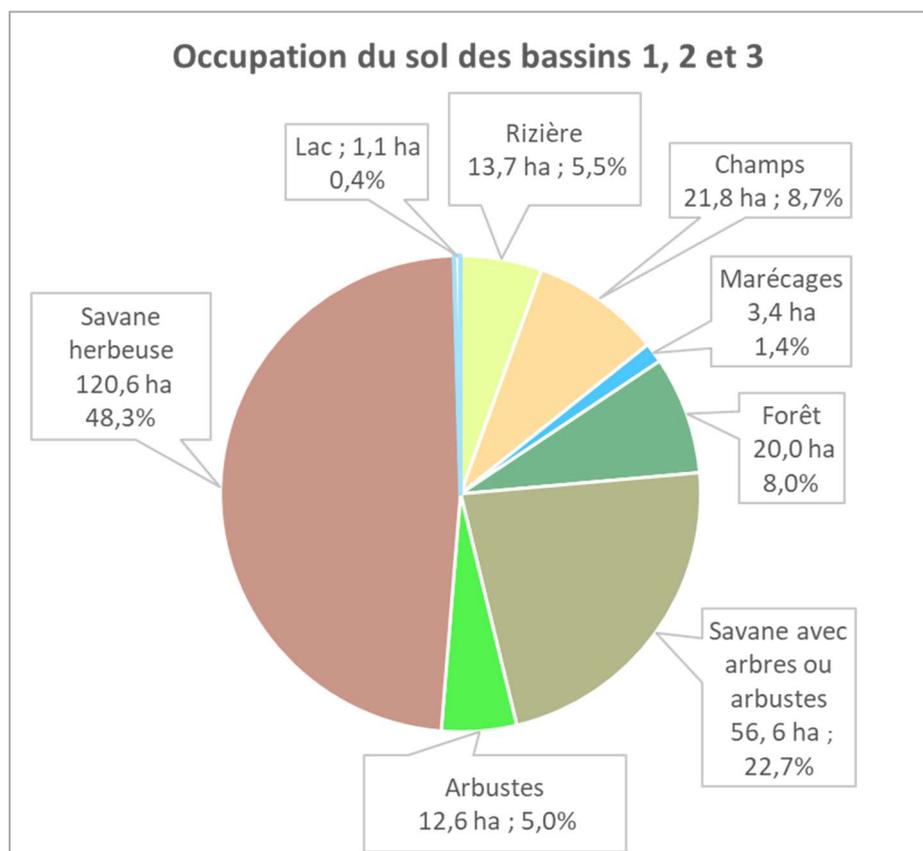


Figure 4: Graphique d'occupation du sol des bassins 1, 2 et 3

Près de la moitié de la zone d'étude est recouverte par de la savane herbeuse. Le site est boisé sur seulement un huitième de sa surface, ce qui est très faible. La savane avec arbres ou arbustes occupent un quart des bassins versants. Malheureusement, les arbres se font de plus en plus rares dans ces zones, majoritairement à cause de la production de charbon. A part une petite surface de lacs et de marécages, les cultures occupent le reste des bassins.

Le site est dans un état dégradé. La faible présence de végétation augmente les phénomènes d'érosion et d'évapotranspiration et mène au comblement des lacs et à une diminution de la quantité d'eau disponible. Actuellement, rien n'est fait pour contrer ces phénomènes, il n'y a pas de campagne de reboisement, les cultures ne sont pas aménagées pour faire face à l'érosion, aucune sensibilisation contre la production de charbon (et donc la création de feux de forêts) n'est faite... La situation va donc s'empirer.

Il est important de noter que le bassin versant 3 est particulièrement en mauvais état, avec 72,2% de savane herbeuse, cela se remarque bien sur la carte page 14.

3.2. Présentation des lacs et des barrages

Les informations concernant les lacs et barrages proviennent du schéma directeur de Fianarantsoa (2017), des observations faites sur le terrain et des agents de station.

Les 6 barrages en béton créent 6 petits lacs artificiels. Les lacs 1, 2, 3 et 6 sont directement reliés à la station (voir Figure 5). Le lac 5 et le trop plein du barrage 6 alimentent le lac 4. Le lac 4 alimente le lac 1.

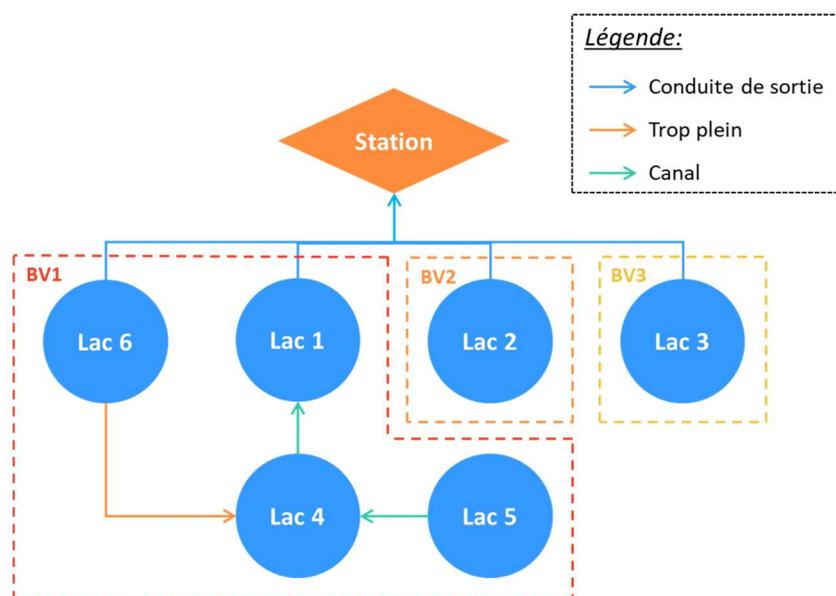


Figure 5: Enchaînement des lacs de Vatosola

Le lac 1 est de loin le plus grand lac, suivi par les lacs 4 et 6. Les surfaces des lacs sont renseignées dans le Tableau 2. Ces chiffres peuvent varier en fonction de la saison et de la prise en compte ou non des bordures marécageuses.

Initialement, les lacs 4 et 5 devaient servir de réserve de stockage. Lorsque le niveau du lac 4 baisse, la vanne de sortie du lac 5 doit être ouverte. En mars 2019 (fin de la saison des pluies), il a été observé que les lacs 1 et 5 débordaient alors que le lac 4 n'était pas plein. Le lac 4 ne fonctionne donc plus comme stockage intermédiaire entre le lac 1 et 5. Les niveaux d'eau dans les lacs en mars 2019 sont disponibles ci-dessous. L'agent de station assure que les lacs 3 et 4 ne dépassent pas ces niveaux, à part lors de cyclones, à cause de leurs nombreuses fuites.

Tableau 2: Surface des lacs et niveau d'eau en mars 2019

Lac	Surface (m ²)	Niveau	Lac	Surface (m ²)	Niveau
Lac 1	6 640	Déborde	Lac 4	2 072	A 0,80m du haut du barrage
Lac 2	55	Déborde	Lac 5	499	Déborde
Lac 3	436	A 1,75m du haut du barrage	Lac 6	1 233	Déborde

Le premier barrage créé est le 3 (date inconnue), il alimentait une ancienne station de traitement. En 1954, une nouvelle station a été construite, ainsi que deux nouveaux barrages, le 1 et le 2. Les dates de création des barrages 4, 5 et 6 ne sont pas connues. En 2002, les barrages 5 et 6 ont été réhaussés pour augmenter leur volume de stockage. Chaque barrage est présenté dans la suite du rapport.

3.2.1. Barrage 1

Description du barrage

Le barrage 1 est le plus haut de Vatosola (4,20 m). Il y a une dizaine d'année, le barrage a cédé, un nouveau barrage a été construit quelques mètres en amont (voir Figure 6). L'ouvrage présente quelques fissures (sur environ 15% de sa surface) et traces de suintement (barrage humide au touché).



Figure 6: Lac et barrage 1

Fuites et déversement

Le barrage ne présente qu'une seule petite fuite. Le déversement se fait par un trop-plein situé sur le côté de l'ouvrage, l'eau déversée s'écoule ensuite dans un canal et finit dans le milieu naturel (voir Figure 7).



Figure 7: Déversoir du barrage 1 (à gauche), fin du canal (à droite)

3.2.2. Barrage 2

L'eau du lac n'est actuellement pas utilisée à la station de traitement car elle est trop trouble. La présence de terres cultivées, majoritairement des rizières, en amont du barrage pose aussi des problèmes de qualité de l'eau brute.

Description du barrage

Le barrage n'est presque pas visible, en 2019 le lac est pratiquement comblé. En effet, un canal transporte des sédiments vers le lac lorsqu'il pleut. Ce canal a été mis en place par les habitants du village situé à côté du barrage pour protéger leurs rizières. Les photos de la Figure 8 présentent l'évolution du comblement du lac entre 2017 et 2019.



Figure 8: Barrage et lac 2

Comme le montre la première photo, le barrage actuellement visible ne représente qu'une petite partie du barrage initial. En 2012 le lac a été curé, sa profondeur moyenne était de 1m50. En mars 2019, les profondeurs du lac varient entre 0,20m et 0,70m, avec une profondeur moyenne de 0,45m.

3.2.3. Barrage 3

L'eau du lac n'est actuellement pas utilisée à la station de traitement car elle est trop trouble.

Description du barrage

Ce barrage est en fait un bassin alimenté par deux canaux qui drainent l'eau du marécage à l'amont du lac. Chaque canal longe un côté du bassin, l'alimentation se fait en trois points (voir Figure 9).

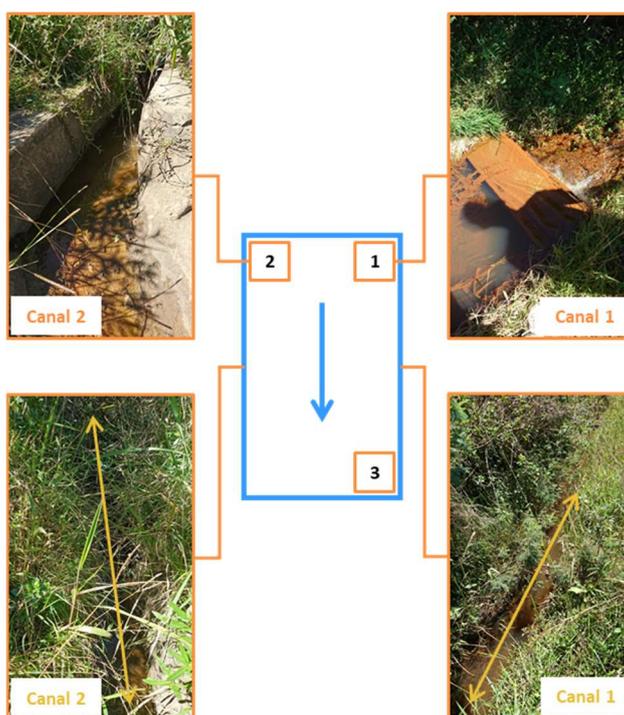


Figure 9: Canaux d'alimentation du lac 3

Le début du canal 1 est en assez bon état. Un petit seuil et une conduite entre le canal et le lac permettent l'alimentation au point 1. L'état du canal se dégrade ensuite, la conduite d'alimentation du point 3 a été volée.

Le canal 2 n'est plus entretenu, le bassin n'est plus alimenté au point 2.

Description du barrage

Le bassin est en très mauvais état. La végétation est abondante sur les parois et dans le fond de l'ouvrage. Des éclats de béton avec fissures ont permis la pousse de plantes, il y a donc des fuites (voir Figure 10).

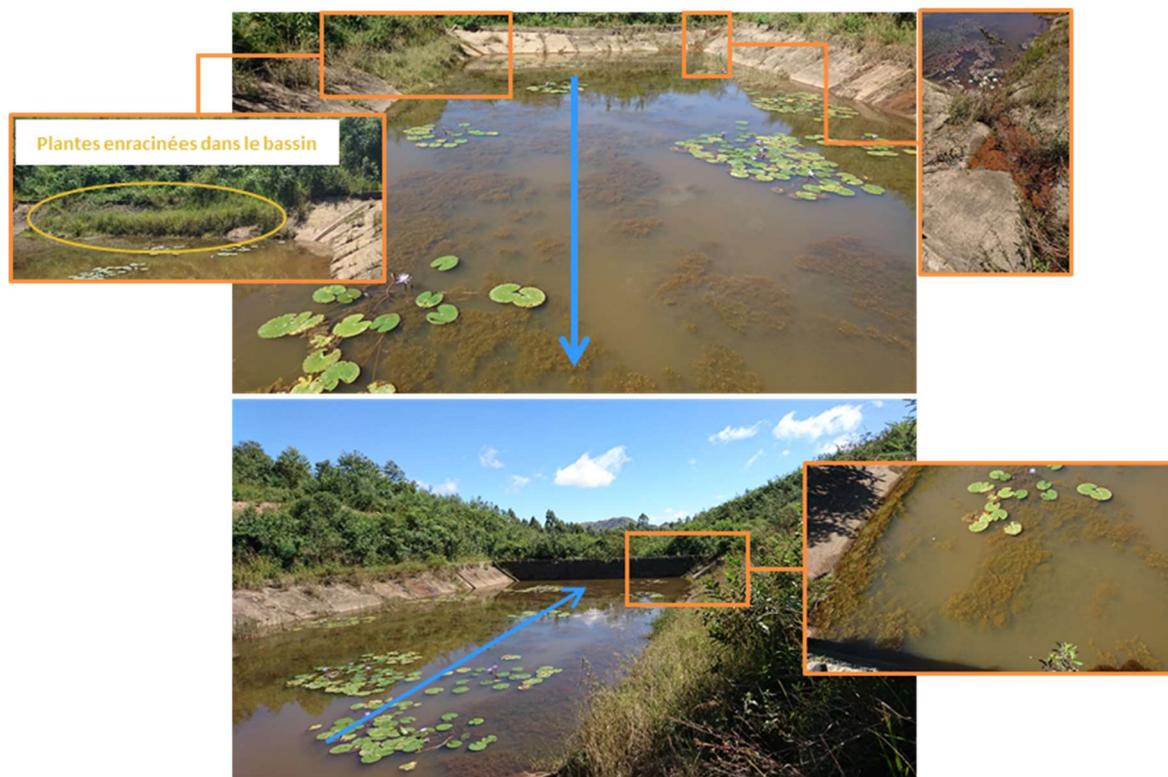


Figure 10: Barrage et lac 3

Une vidange de l'ouvrage permettrait d'évaluer l'état du radier. La vanne de vidange est malheureusement bouchée. Le canal de trop plein du bassin s'est totalement effondré (voir Figure 11).



Figure 11: Reste du canal de trop plein (à l'aval du barrage 3)

Fuites et déversement

Théoriquement, le déversement se fait par un trop-plein situé au milieu du barrage (voir Figure 12). Le niveau n'atteint que très rarement cette hauteur, les fuites se font par le fond de l'ouvrage d'après l'agent de station.



Figure 12: Trop-plein du barrage 3

3.2.4. Barrage 4

Description du barrage

Le barrage est dans un état moyen. Côté lac des éclats de béton ont permis à des plantes de prendre racine dans le béton (voir Figure 13).



Figure 13: Barrage 4

Fuites et déversement

Le barrage a deux fuites (éclats de béton), des cailloux ont été placés par les agents de station afin de limiter les fuites (voir Figure 14). Le déversement se fait par surverse, tout du long du barrage, mais le niveau n'atteint que très rarement cette hauteur.



Figure 14: Fuites du barrage 4

3.2.5. Barrage 5

Description du barrage

Le barrage est dans un état moyen (voir Figure 15). L'ouvrage présente quelques fissures (sur environ 10% de sa surface) et traces de suintement (barrage humide au touché).



Figure 15: Barrage 5

Fuites et déversements

Le barrage n'a pas de fuite. Le déversement se fait en surverse.

3.2.6. Barrage 6

Description du barrage

Le barrage est dans un état moyen (voir Figure 16). L'ouvrage présente quelques fissures (sur environ 10% de sa surface), sur la partie extérieure il y a des dépôts organiques et de la mousse.



Figure 16: Barrage 6

Fuites et déversements

En 2017, le barrage a été prolongé à droite côté lac pour lutter contre le comblement du lac. Aucune étude n'a été faite, cette partie n'a pas de fondations. Ceci a créé des fuites, l'eau passe en-dessous du barrage (voir Figure 17).



Figure 17: Fuites du barrage 6

D'après l'agent de station, cela fait 10 ans qu'il y a une autre fuite en fond de bassin. Ceci doit être vérifié en période d'étiage. Toutes les fuites se rejoignent en une cascade à l'aval du barrage (voir Figure 18).



Figure 18: Fuites du barrage 6 (aval du barrage)

Il est conseillé à la JIRAMA de faire un vrai diagnostic du génie civil des barrages afin d'évaluer leur état et de connaître les réparations à faire.

3.3. Présentation de la station de production

La station a été construite en 1954, c'est la plus ancienne de Fianarantsoa. Elle est située à 3 km au sud-ouest de la ville à un altitude de 1348m.



Figure 19: Photo de la station de Vatosola

La figure ci-dessous résume la filière.

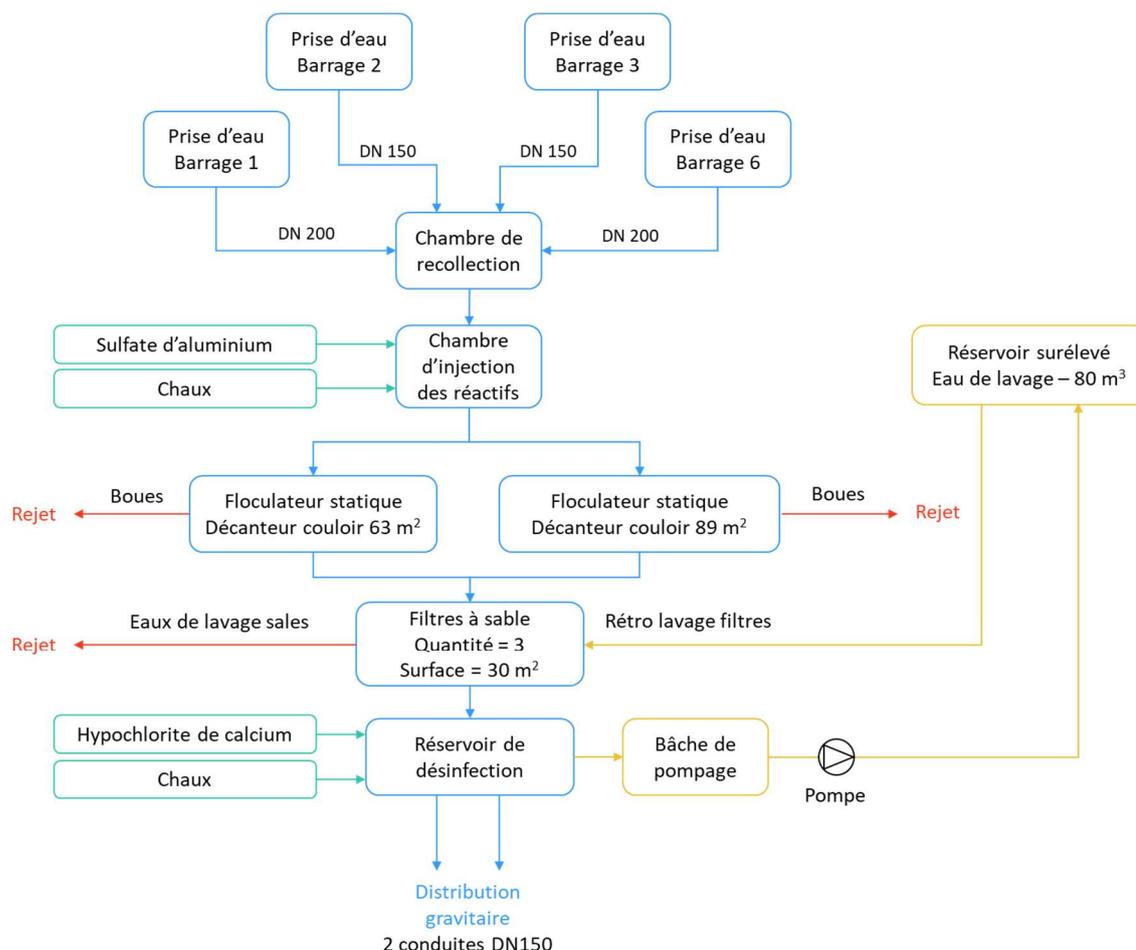


Figure 20 : Schéma synoptique de la filière de traitement

Chaque étape de traitement est détaillée dans les parties suivantes.

3.3.1. Prise d'eau

Théoriquement, la station est alimentée par les lacs 1, 2, 3 et 6. Le Tableau 3 résume les caractéristiques des conduites entre les barrages et la station. Chaque prise d'eau est équipée d'un dégrilleur.

Tableau 3: Caractéristiques des conduites entre les barrages et la station

Lac	Conduite barrage-station	Lac	Conduite barrage-station
1	Fonte DN200	3	PVC DN90 puis Fonte DN150
2	PVC DN90 puis Fonte DN150	6	Fonte DN200

3.3.2. Réactifs de prétraitement (sulfate d'alumine et chaux)

La chaux puis le sulfate d'alumine (coagulant) sont introduits dans l'eau brute dans la chambre d'injection. Le bac de préparation du sulfate d'alumine est situé à l'amont de celui de la chaux mais le sulfate est injecté à l'aval de la chaux. La Figure 21 présente le plan de la chambre d'injection.

La chaux est importée d'Inde et le sulfate d'alumine de Chine et d'Indonésie.

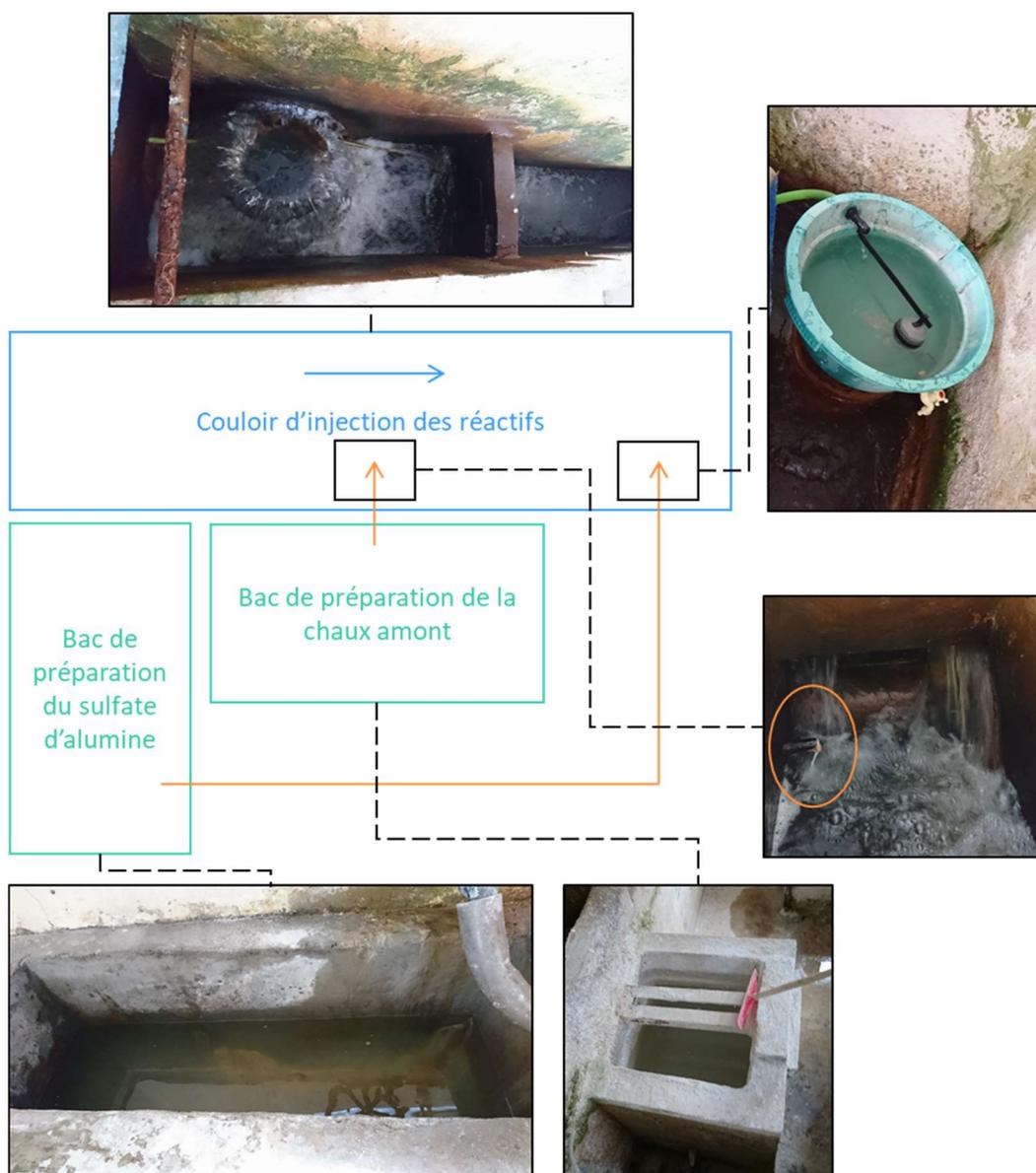


Figure 21: Plan de la chambre d'injection

La chaux amont permet de compenser la perte de TAC due à l'injection de sulfate d'alumine et de remonter le pH si besoin (en cas de dose importante de coagulant). La solution est préparée deux fois par jour à 15h et à 3h, avec de l'eau traitée provenant du réservoir de la station. Théoriquement la chaux est injectée à 50 L/h. La quantité de réactif injectée dans le bac de préparation est ajustée en fonction du pH de l'eau brute. L'injection se fait donc à débit constant mais à concentration variable.

Du dépôt s'accumule sur l'intérieur du bac de préparation de la chaux et les deux barres au-dessus du bac. Ce dépôt est raclé et ajouté à la préparation. Il n'y a pas d'agitateur, le mélange se fait manuellement.

La chaux est injectée à l'aval d'une chute, il n'y a pas système de régulation du débit, la valeur annoncée par l'agent de station est donc probablement fausse.

Le sulfate d'alumine est utilisé comme coagulant. La solution est préparée deux fois par jour à 15h et à 3h, avec de l'eau traitée provenant du réservoir de la station. Le débit d'injection du sulfate d'alumine est 42L/h, la quantité de réactif injectée dans le bac de préparation est ajustée en fonction de la turbidité et du taux de fer de l'eau brute. L'injection se fait donc à débit constant mais à concentration variable.

Il n'y a pas d'agitateur dans le bac de préparation du sulfate d'alumine, le mélange se fait manuellement.

Un tuyau relie le bac de préparation à un bac de dosage équipé d'un robinet à flotteur.

3.3.3. Coagulation

L'ouvrage de coagulation est de type couloir, statique (voir Figure 22).

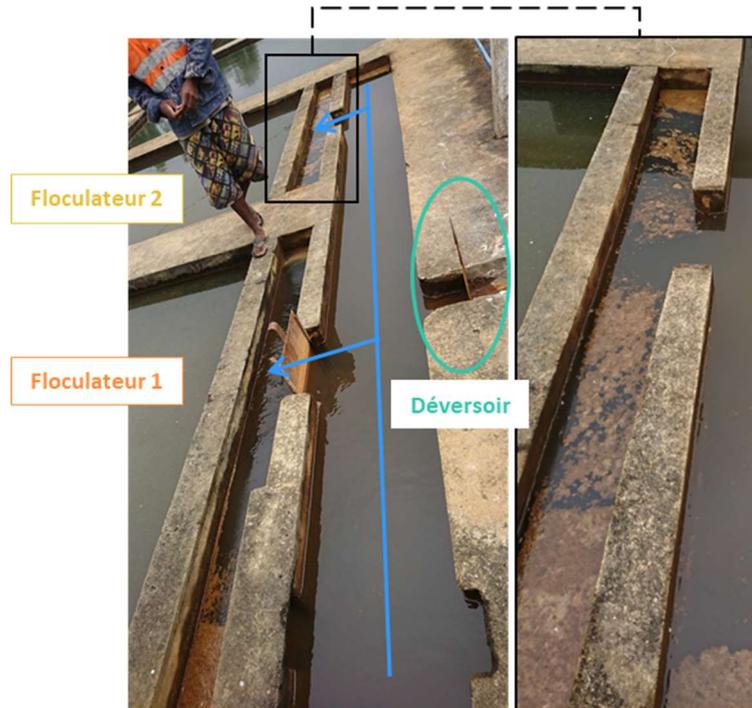


Figure 22: Ouvrage de coagulation

Le couloir est doté d'un déversoir qui est utilisé lorsque le débit en sortie de chambre d'injection est trop fort. L'eau déversée est déjà traitée à la chaux et au sulfate d'alumine. Une quantité importante de floccs s'accumule dans les parties mortes de l'ouvrage.

La filière se sépare en deux après la coagulation. Le débit allant vers le floculateur 1 est réglé par une vanne. Une conduite à l'aval du floculateur 2 limite le débit entrant.

3.3.4. Flocculation

Les floculateurs sont de type longitudinal statique, voir Figure 23.



Figure 23: Floculateurs

En sortie du flocculateur 1 l'eau est amenée au décanteur 1 par un couloir. Une conduite passant par le filtre 3 relie le flocculateur 2 au décanteur 2.

3.3.5. Décantation

La station est équipée de deux décanteurs, en période d'étiage (faible production) seul le décanteur 1 est en marche. Chaque décanteur est purgé une fois par mois.

3.3.5.1 Décanteur 1

Le décanteur 1 est de type longitudinal statique. L'eau décantée est amenée aux filtres par un couloir (voir Figure 24).



Figure 24: Décanteur 1

Le début du décanteur est chicané pour permettre une meilleure circulation de l'eau (voir Figure 25).

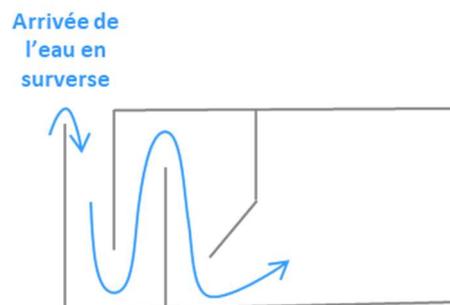


Figure 25: Début du décanteur 1

3.3.5.2 Décanteur 2

Le décanteur 2 est de type longitudinal statique. Avant d'arriver au décanteur, l'eau passe d'abord dans un couloir lamellé. L'eau décantée est transportée dans une conduite jusqu'à un petit réservoir puis jusqu'aux filtres (voir Figure 26).



Figure 26: Décanteur 2

3.3.6. Filtration

La station est équipée de trois filtres à sable (filtration rapide). L'eau est amenée du décanteur 1 par un couloir et du décanteur 2 par une conduite (voir Figure 27). Chaque filtre est lavé tous les trois jours.

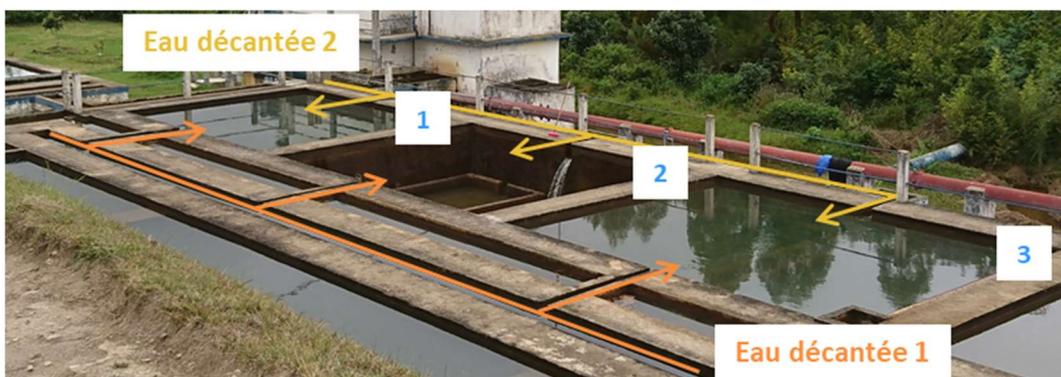


Figure 27: Filtres à sable

Les plans des filtres ne sont pas disponibles. Les trois filtres sont identiques, il y a des couloirs de récupération des eaux de lavage au centre et de chaque côté des filtres (voir Figure 28). Les couloirs sont reliés à l'intérieur des filtres par des encoches qui sont fermées lors du lavage.



Figure 28: Filtre 1 vide

Le plancher est crépiné, équipé de buselures (voir Figure 29).



Figure 29: Plancher du filtre

3.3.7. Désinfection – Neutralisation

La chaux et l'hypochlorite de calcium sont introduits dans l'eau filtrée dans le réservoir de désinfection. La Figure 30 présente le plan de la chambre de désinfection.

La chaux est importée d'Inde, avant 2005 l'hypochlorite était obtenu par électrochloration, l'électrolyseur ne fonctionne plus, l'hypochlorite est maintenant importé de Chine.

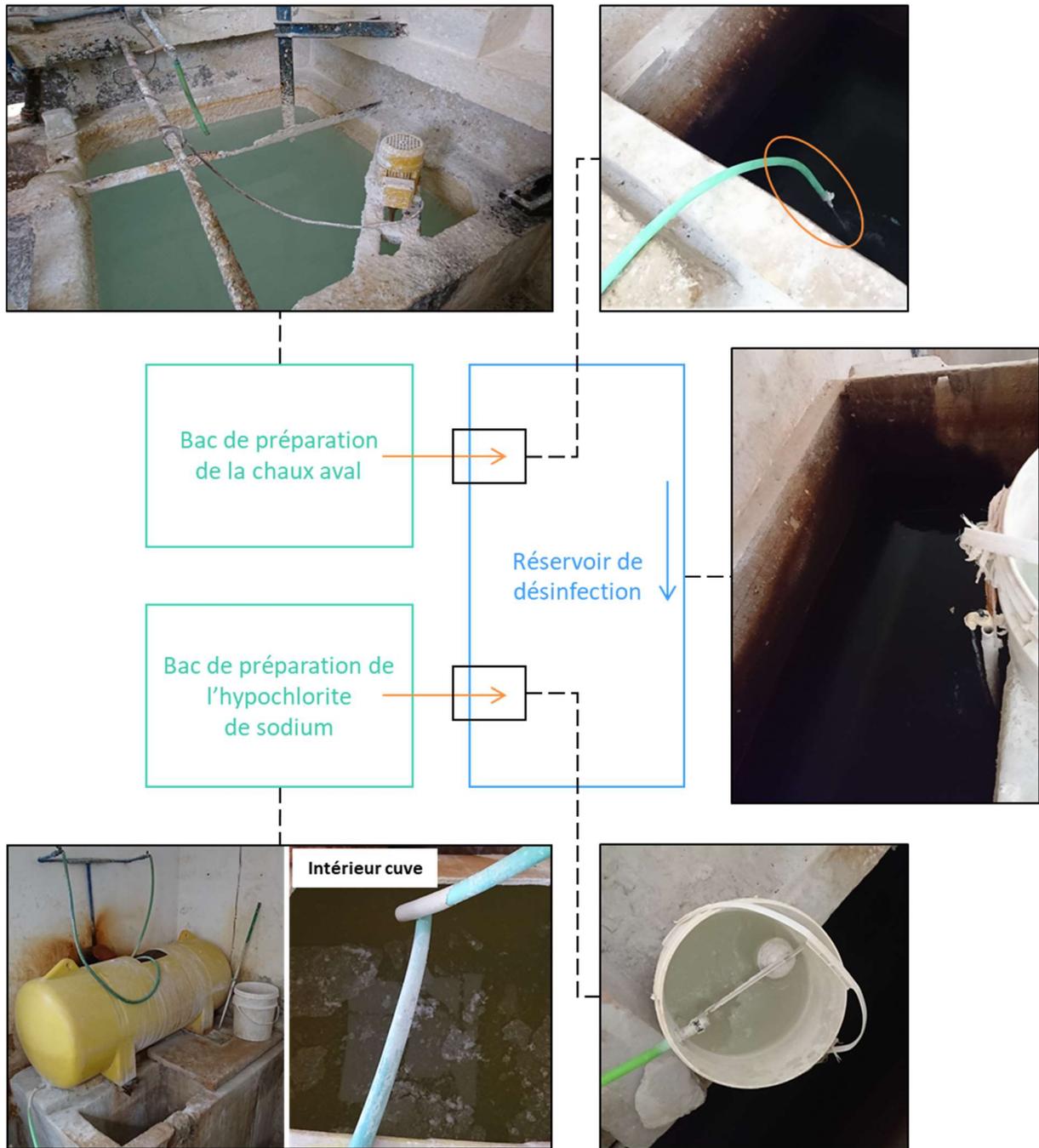


Figure 30: Plan de la chambre de désinfection

La chaux aval permet d'ajuster le pH final de l'eau. La solution est préparée deux fois par jour à 15h et à 3h, avec de l'eau traitée provenant du réservoir de la station. Théoriquement la chaux est injectée à 50L/h. La quantité de réactif injecté dans le bac de préparation est ajustée en fonction du pH de l'eau filtrée. L'injection se fait donc à débit constant mais à concentration variable.

Du dépôt s'accumule sur l'intérieur du bac de préparation de la chaux. Ce dépôt est raclé et ajouté à la préparation. Il y a un agitateur qui fonctionne mais il n'est pas allumé en permanence, il est utilisé toutes les heures pendant 2 à 3 minutes.

Un tuyau relie le bac de préparation au réservoir de désinfection, il n'y a pas système de régulation du débit, la valeur annoncée par l'agent de station est donc probablement fausse.

L'eau est ensuite désinfectée à l'hypochlorite de calcium, ce réactif a un effet bactéricide et rémanent. La solution est préparée deux fois par jour à 15h et à 3h, avec de l'eau traitée provenant du réservoir de la station. Le débit d'injection de l'hypochlorite de calcium est 42L/h. L'injection se fait à débit constant mais à concentration variable.

La cuve de préparation de l'hypochlorite n'est pas adaptée à la préparation de réactif. Il n'y a pas d'agitateur, le mélange se fait manuellement. De plus, la cuve est très compliquée d'accès.

Un tuyau relie le bac de préparation à un bac de dosage équipé d'un robinet à flotteur.

4. Données de l'étude

4.1. Données disponibles

4.1.1. Précipitations

4.1.1.1 Station météo de l'aérodrome de Fianarantsoa

L'aérodrome de Fianarantsoa dispose d'un pluviomètre depuis 1940, il est situé à 8 km de Vatosola à une altitude de 1110 m. La station météo propose aussi des données (pluviométrie journalière et mensuelle) extrapolées dans toute la région, dont à Vatosola. Ces données sont souvent utilisées par le programme Eaurizon pour des études dans la région, cependant la méthode d'extrapolation n'est pas connue, et ne peut donc être vérifiée, c'est pourquoi une autre source de données est cherchée.

4.1.1.2 Base de données WorldClim

La base de données WorldClim a été construite en 2005 par un groupe de chercheurs de l'Université de Californie. Elle compile les données climatiques de plusieurs dizaines de milliers de stations météo dans le monde (dont l'aérodrome de Fianarantsoa). Une méthode d'interpolation basée sur l'altitude, la longitude et la latitude complète la base de données et permet une représentation spatiale d'une résolution de 1 km². La base de données fournit les moyennes mensuelles des précipitations en se basant sur la période 1970-2000. Les données de WorldClim sont en accès libre.

Afin de vérifier les données fournies par WorldClim, les moyennes mensuelles des précipitations à l'aérodrome de Fianarantsoa de WorldClim ont été comparées aux moyennes réelles de la station météo de l'aérodrome de Fianarantsoa entre 1970 et 2000. En moyenne, la différence entre les deux est de 26%, avec 3 mois au-dessus de 65%. La pluviométrie est surestimée par WorldClim pour tous les mois (sauf octobre).

Dans le contexte de l'étude, il est préférable de sous-estimer les précipitations afin de se placer dans le pire des cas. Les données utilisées seront donc celles résultant de l'extrapolation de la station météo de l'aéroport de Fianarantsoa.

4.1.1.3 Analyse statistique des données

L'historique des données disponibles, de 1940 à 2017, permet une analyse statistique des données. L'objectif est de déterminer les périodes de retour des sécheresses. La loi de Gumbel est utilisée pour calculer les sécheresses de temps de retour 5, 10 et 100 ans. Le *Tableau 4* présente les statistiques pluviométriques annuelles.

Tableau 4: Statistiques pluviométriques annuelles et sécheresses de temps de retour 5 à 100 ans

Statistiques pluviométriques annuelles		Temps de retour (années)	Précipitations (mm)
Moyenne (mm)	1 108	5	924
Minimum (mm)	648 (1977-1978)	10	862
Maximum (mm)	1780 (1969-1970)	100	740

D'une année sur l'autre la pluviométrie peut varier de plusieurs centaines de millimètres, il y a une forte variabilité interannuelle. Dans les 15 dernières années, il y a eu deux grandes sécheresses, l'année 2016-2017 (décennale) et 2005-2006 (centennale).

4.1.2. Prélèvements

Au niveau des barrages, les débits de captage ne sont pas contrôlés, les seuls compteurs sont sur les deux conduites de distribution, 3km en aval de la station de traitement. Ces mesures ne prennent pas en compte les fuites des conduites d'adduction et de distribution ni les pertes à la station. Les eaux de lavage des filtres (50 m³/j) sont comptabilisées dans la production journalière. L'évolution de la production à Vatosola est résumée ci-dessous.

Tableau 5: Evolution de la production à Vatosola entre 2013 et 2018

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total (m ³)	649 854	613 247	638 062	511 353	468 987	616 221
Moyenne (m ³ /j)	1 780	1 680	1 748	1 397	1 285	1 693
Minimum (m ³ /j)	1 498	592	1 019	445	364	592
Maximum (m ³ /j)	2 005	2 222	1 885	2 684	1 990	1 943
Nombre de jours < 1700 m ³ /j	51	94	52	247	252	96

Les prélèvements journaliers théoriques sont de 1 700 m³/j. La production est cependant très instable et très dépendante de la météo. Pendant la saison sèche, la production peut baisser jusqu'à 400 m³/j.

4.2. Données estimées

4.2.1. Evapotranspiration réelle

L'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a mis en place une carte mondiale d'évapotranspiration de référence (ET_o) mensuelle. L'ET_o est calculée selon la méthode de Penman-Monteith, à partir de données de stations climatiques telles que les durées d'insolation, la vitesse du vent, le rayonnement et la température moyennées sur trente ans.

Pour calculer l'évapotranspiration réelle, la FAO donne la formule suivante [8]:

$$ETR = ET_o * K_c$$

Avec :

ETR l'évapotranspiration réelle (mm/mois)

ET_o l'évapotranspiration de référence (mm/mois)

K_c le coefficient cultural variant en fonction de la culture et du stade de croissance

La difficulté est d'évaluer K_c le plus précisément possible. Le coefficient cultural dépend du type de culture et du stade de croissance. Dans un premier temps, ce coefficient sera estimé chaque mois pour chaque type d'occupation : rizières, champs, marécages, forêt, arbustes, savane avec arbres ou arbustes et savane herbeuse.

Rizières et champs

Pour chaque type de culture, la FAO a établi le coefficient cultural pour quatre stades : la phase initiale (juste après les semis), la phase de développement, la phase de mi-croissance et la phase tardive (mûrissement avant la récolte) (voir Annexe 2). Le calendrier cultural de Madagascar a permis de définir les mois correspondant à chaque stade.

Marécages

Il est considéré que les marécages ont la même évaporation que les lacs, soit K_c = 1.

Forêts et arbustes

Pour une surface boisée (feuillus) le coefficient cultural est de 0,5 en automne-hiver et de 1,2 en printemps-été [9].

Savane avec arbres ou arbustes et savane herbeuse

Le couvert végétal étant très faible pour ces deux types d'occupation, la savane avec arbres ou arbustes et la savane herbeuse seront considérés comme du sol nu. Pour les sols nus, le coefficient cultural est d'environ de 0,5 [9]. Les résultats sont résumés dans le

Tableau 6.

Tableau 6: Coefficient cultural pour chaque type d'occupation du sol et chaque mois

	Octobre	Novembre	Décembre à Mars	Avril	Mai à Septembre
Rizière	1,2	1,15	1,1	0,8	0,5
Champs	0,6	0,85	1,1	0,9	0,5
Marécages	1	1	1	1	1
Forêt	1,2	1,2	1,2	0,5	0,5
Savane avec arbres ou arbustes	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Arbustes	1,2	1,2	1,2	0,5	0,5
Savane herbeuse	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

En zone aride et humide, il faut corriger ces coefficients. Une formule permet de quantifier les modifications de Kc en fonction du vent et de l'humidité [10] :

$$Kc' = Kc + [0,04*(u - 2) - 0,004*(\theta - 45)] * (h/3)^{0,3}$$

Avec :

u : la valeur moyenne de la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m/s)

θ : la valeur moyenne de l'humidité relative journalière (%)

h : la hauteur moyenne de la culture (m)

La station météo de l'aérodrome de Fianarantsoa fournit les valeurs moyennes de l'humidité relative et de la vitesse du vent à Fianarantsoa. La formule a été appliquée à chaque type d'occupation du sol, chaque mois. Les valeurs obtenues sont ensuite pondérées par le pourcentage d'occupation du sol (voir Figure 4, p15) pour obtenir une valeur de Kc par mois. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 7: Kc mensuel pour les bassins versants de Vatosola

Mois	Kc final	Mois	Kc final	Mois	Kc final
Janvier	0,56	Mai	0,38	Septembre	0,42
Février	0,56	Juin	0,38	Octobre	0,56
Mars	0,56	Juillet	0,38	Novembre	0,57
Avril	0,43	Août	0,40	Décembre	0,57

Evaporation en eau libre

Pour un lac, le coefficient de culture est égal à un et il n'y a pas de transpiration [8]. L'équation devient donc :

$$E_v = ETo$$

Les volumes évaporés des lacs peuvent donc être estimés avec la base de données de la FAO. Sur l'ensemble des lacs, l'évaporation représente entre 700 m³ et 1 400 m³ par mois.

4.3. Données mesurées

4.3.1. Volume de stockage

Une campagne de bathymétrie (mesure de la profondeur des lacs) a été réalisée en mars 2019. Au total, 752 mesures ont été faites, soit une mesure pour 25 m². Une interpolation sous QGis a permis d'estimer les volumes des lacs. Le résultat de l'interpolation est disponible sous forme de carte des profondeurs des lacs en Annexe 3, p56.

Les caractéristiques de chaque lac sont données ci-dessous. Les volumes sont donnés pour un certain niveau d'eau dans le barrage, l'agent de station assure que les lacs 3 et 4 ne dépassent pas ces niveaux, à part lors de cyclones, à cause de leurs nombreuses fuites.

Tableau 8: Résultats de la bathymétrie

Lac	Volume (m ³)	Profondeur moyenne (m)	Niveau d'eau
1	16 594	2,57	Déborde
2	24	0,45	Déborde
3	533	1,24	A 1,75m du haut du barrage
4	2 647	1,31	A 0,80m du haut du barrage
5	722	1,51	Déborde
6	1 770	1,48	Déborde

Au total, la capacité de stockage de Vatosola est d'environ 22 300 m³. Si les barrages 3 et 4 sont pleins, leur stockage augmentera respectivement d'environ 800 m³ et 1 700 m³, **la capacité de stockage totale sera alors d'environ 24 800 m³.**

4.3.2. Hauteurs d'eau dans les barrages et fuites

Une campagne de mesure des hauteurs d'eau et fuites des barrages a été effectuée du 8 au 20 mai 2019. A cette période, les lacs 2 et 3 n'alimentaient pas la station, les mesures n'ont donc pas été faites sur ces lacs. La mesure des hauteurs d'eau permet de connaître la variation de stock journalière des lacs. En mai 2019 les barrages 4 et 6 ne déversaient pas. Le débit déversé du barrage 5 était très faible et non mesurable. La fuite du barrage 1 est située sur un côté de l'ouvrage et n'est pas accessible à cause de la végétation, elle est cependant bien visible en aval de l'ouvrage. Le *Tableau 9* résume les possibilités de mesure des fuites et déversements. Les résultats de la campagne de mesure sont disponibles en Annexe 4, p57.

Tableau 9: Résumé des possibilités de mesure des fuites et déversements

	Fuites dans le barrage	Mesure des fuites	Mesure des déversements
Barrage 1	Oui (une petite)	Non mesurable	Mesure « au seau »
Barrage 4	Oui	Non mesurable	-
Barrage 5	Non	-	-
Barrage 6	Oui	Mesure « au seau »	-

4.3.3. Ouvrages de la station

Les plans de la station ne sont pas disponibles, il a donc été nécessaire de mesurer tous les ouvrages pour pouvoir analyser le dimensionnement de la station. Les dimensions de chaque étape de traitement sont détaillées dans les parties suivantes.

4.3.3.1 Réactifs de prétraitement (sulfate d'alumine et chaux)

Le *Tableau 10* présente les caractéristiques des bacs de préparation de la chaux amont et du sulfate d'alumine.

Tableau 10: Caractéristiques des bacs de préparation des réactifs de prétraitement

	Chaux amont	Sulfate d'alumine
Largeur (m)	0,6	1,5
Longueur (m)	0,6	0,5
Hauteur (m)	0,85	0,7
Volume (L)	306	525

4.3.3.2 Coagulation – Flocculation - Décantation

Le *Tableau 11* présente les caractéristiques des ouvrages. Les deux flocculateurs ont les mêmes dimensions.

Tableau 11: Caractéristiques des ouvrages de coagulation, flocculation et décantation

	Couloir de coagulation	Flocculateur	Décanteur 1	Décanteur 2
Largeur (m)	0,5	2,95	2,4	5,5
Longueur (m)	6,25	3,9	26,45	16,1
Hauteur d'eau max (m)	0,5	2,9	2,65	2,85
Hauteur d'eau min (m)	0,5	2,9	2,1	2,3
Surface (m ²)	3,1	11,5	63	89
Volume (m ³)	1,6	33,4	132,3	204,7

4.3.3.3 Filtration

Les trois filtres ont les mêmes dimensions, 5 m x 6 m, soit une surface de 30 m² chacun. La hauteur de sable est d'environ 60 cm. Les couloirs de récupération des eaux de lavage ont la même hauteur, le couloir central est plus large que les couloirs latéraux (voir Figure 31).

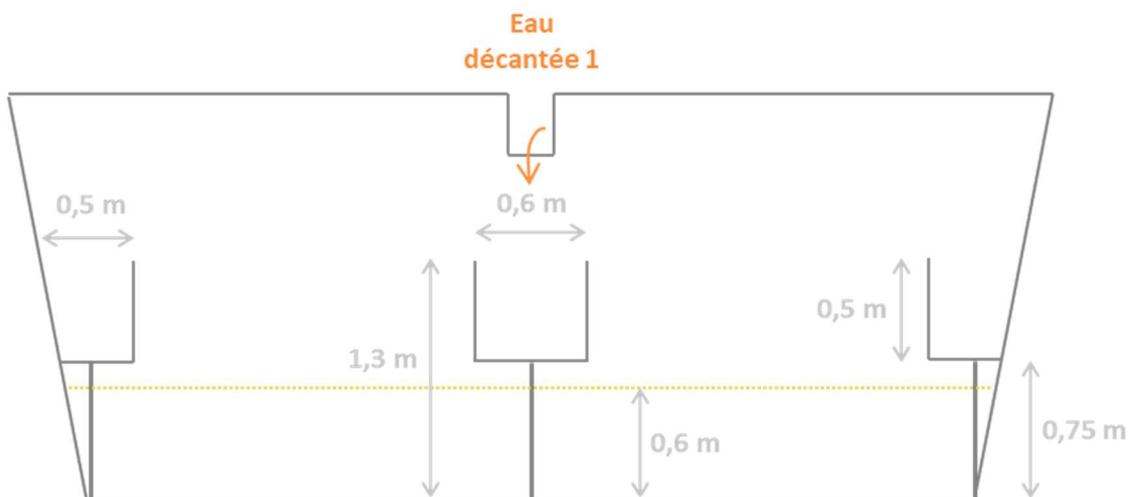


Figure 31: Schéma de coupe d'un filtre

4.3.3.4 Désinfection – Neutralisation

Le *Tableau 12* présente les caractéristiques des bacs de préparation de la chaux aval et de l'hypochlorite de calcium (cuve).

Tableau 12: Caractéristiques des bacs de préparation des réactifs de désinfection et neutralisation

	Chaux aval	Hypochlorite de calcium
Largeur (m)	1,3	-
Longueur (m)	1,3	-
Hauteur (m)	0,7	-
Volume (L)	1180	500

5. Définition de la méthodologie

5.1. Quantité d'eau disponible

Afin d'évaluer la quantité d'eau disponible, un bilan hydrologique annuel est établi. Ne disposant d'aucune information sur l'infiltration, les écoulements souterrains et le ruissellement, le bilan hydrologique a été simplifié, les transferts entre les bassins, les lacs et la nappe ne sont pas étudiés. La Figure 32 présente les types de transferts étudiés.

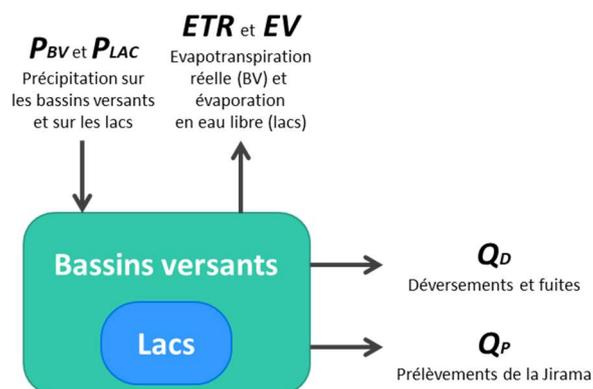


Figure 32: Bilan hydrologique simplifié des bassins versants de Vatosola

Dans cette partie, il sera considéré que le volume d'eau entrant dans le bassin versant est égal au volume sortant. C'est-à-dire :

$$P_{BV} + P_{LAC} = ETR + EV + Q_P + Q_D \quad (1)$$

Les résultats sont vérifiés grâce à une formule établie par le CTGREF qui permet d'estimer les apports annuels d'un bassin versant vers son exutoire [11]:

$$QA = \frac{S}{31,5} * \left(\frac{P}{B}\right)^{\frac{5}{3}} * \left(\frac{Zm}{100}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Avec:

QA débit annuel moyen en L/s

S surface du bassin en km²

P précipitation moyenne annuelle en mm

Zm altitude moyenne du bassin en m

B un paramètre régional, pour la région Haute Matsiatra **B** = 46 [11]

Ce bilan va permettre :

- ◆ De quantifier l'eau disponible,
- ◆ D'estimer les pertes d'eau annuelles par déversements et fuites,
- ◆ D'évaluer l'impact des prélèvements de la JIRAMA,
- ◆ De conclure sur la possibilité d'augmenter les prélèvements (vis-à-vis de la ressource).

Les barrages 2 et 3 sont en très mauvais état, afin de connaître la quantité d'eau disponible s'ils ne sont pas réhabilités quatre scénarios sont étudiés :

- ◆ Scénario 0 : situation initiale, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 1 : seul le bassin versant 1 est conservé, les lacs 2 et 3 ne sont plus utilisés pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 2 : les bassins versants 1 et 2 sont conservés, le lac 3 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 3 : les bassins versants 1 et 3 sont conservés, le lac 2 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station.

Pour chaque scénario plusieurs situations sont étudiées, en prenant en compte les années de sécheresse et le changement de la production journalière.

5.2. Stockage

5.2.1. Bilan hydrologique des lacs « à l'instant T »

Afin de compléter l'analyse de la ressource en eau, il faut étudier les apports de chaque bassin à son lac et les transferts entre les lacs. Dans un premier temps, un bilan hydrologique des lacs « à l'instant T » a été réalisé en mai 2019. A cette période, les prélèvements de la JIRAMA se faisaient sur les lacs 1 et 6, ce bilan ne concerne donc que le bassin versant 1.

Ne disposant d'aucune information sur l'infiltration, les écoulements souterrains et le ruissellement, les apports des bassins vers les lacs sont regroupés en un paramètre « ruissellement et écoulements souterrains ». Ce paramètre prend en compte la précipitation sur les bassins et l'évapotranspiration des bassins. Les bassins versants 1 et 4 ont été modifiés pour ce bilan afin de correspondre à l'aire d'alimentation des lacs 1 et 4 (voir Figure 33).

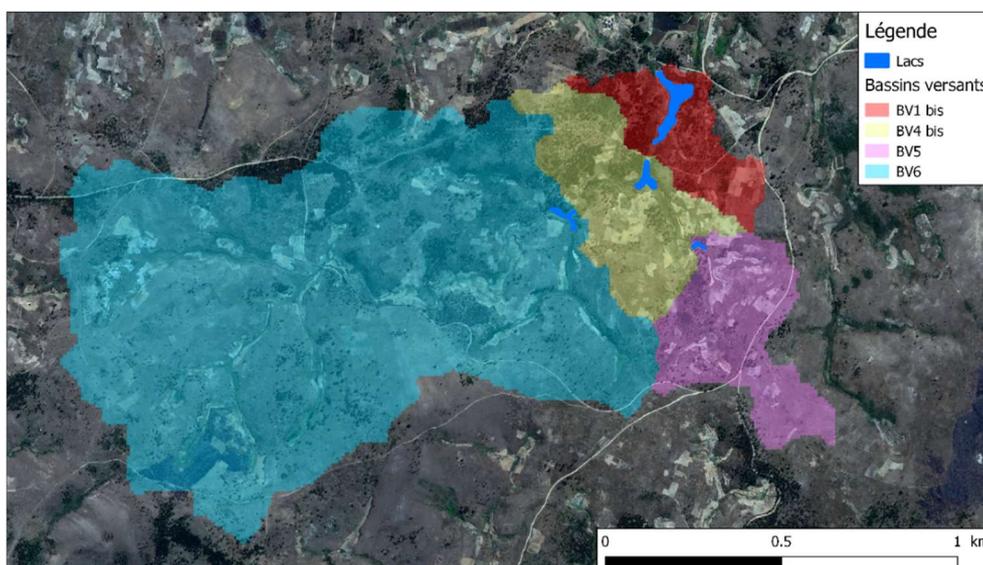


Figure 33: Bassins versants modifiés

Les barrages 5 et 6 sont situés à 200 m du lac 4, alors que le lac 4 se jette presque directement dans le lac 1. Le bilan prend donc en compte les pertes entre les barrages 5 et 6 et le lac 4.

Les productions journalières fournies par la JIRAMA sont la somme des prélèvements des lacs 1 et 6. Les conduites d'amenée de ces deux barrages ont le même diamètre, dans la suite il est considéré que chaque lac contribue à 50% de la production journalière.

La campagne de mesures effectuée du 8 au 20 mai 2019 a permis de connaître le débit de fuite du barrage 6 et le débit déversé au barrage 1.

La Figure 34 présente les types de transferts étudiés, avec les paramètres connus en gris et les inconnus en noir.

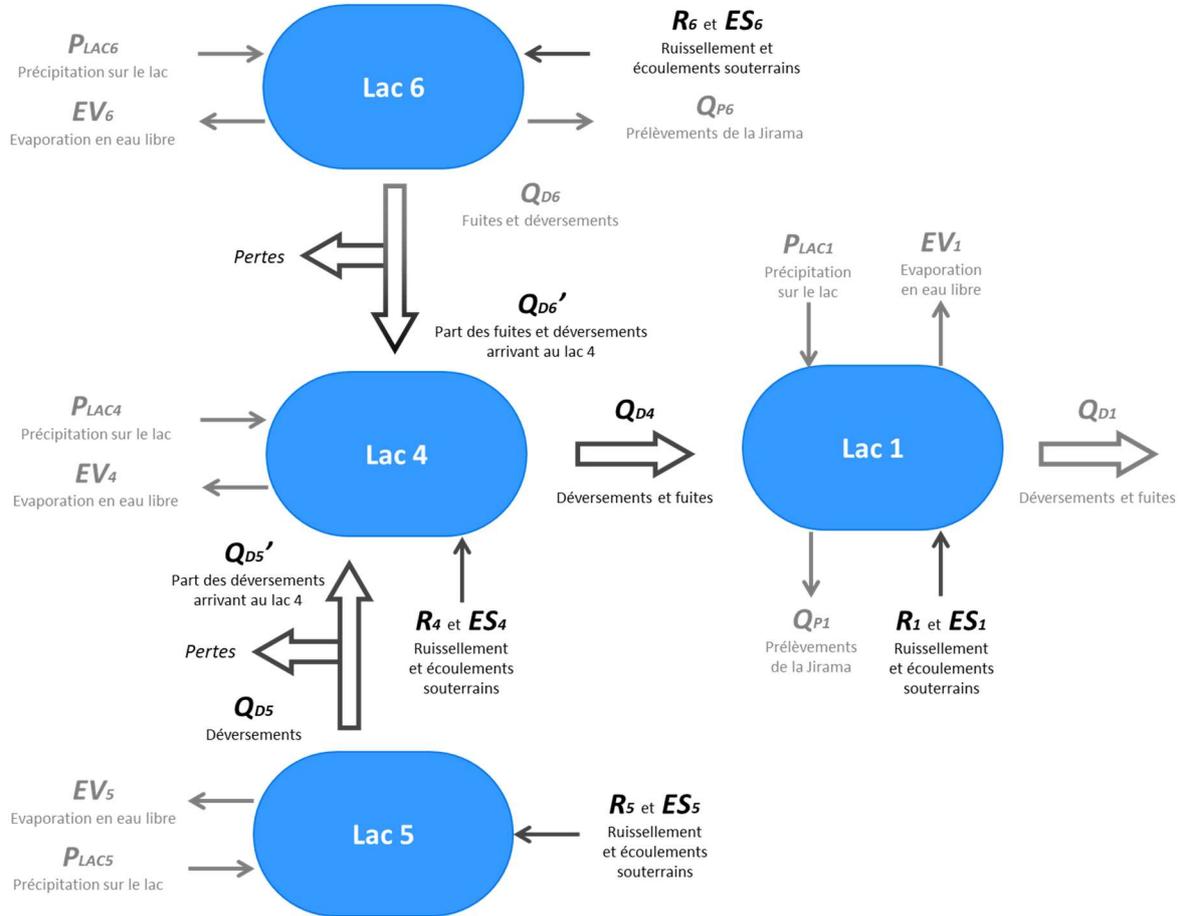


Figure 34: Bilan hydrologique des lacs de Vatosola

Lors de la période de mesure (8 mai au 20 mai 2019), le niveau d'eau dans les lacs n'a presque pas changé, ce qui entre dans chaque lac est donc égal à ce qui en sort. Ceci permet de poser les équations suivantes (paramètres connus en gris) :

$$R_6 + ES_6 + P_{LAC6} = EV_6 + Q_{P6} + Q_{D6} \quad (3)$$

$$R_1 + ES_1 + Q_{D4} + P_{LAC1} = EV_1 + Q_{P1} + Q_{D1} \quad (4)$$

$$R_4 + ES_4 + Q_{D5}' + Q_{D6}' + P_{LAC4} = EV_4 + Q_{D4} \quad (5)$$

$$R_5 + ES_5 + P_{LAC5} = EV_5 + Q_{D5} \quad (6)$$

Avec tous les paramètres en m^3/j

Pour les bassins considérés dans cette partie, parmi les paramètres utilisés par le CTGREF pour estimer les apports d'un bassin versant vers son exutoire (équation 2, p37) seules leur altitude moyenne et leur surface varient. L'altitude moyenne des bassins ne diffère que de quelques mètres, il est donc considéré dans la suite que proportionnellement à sa taille chaque bassin a le même apport vers son lac, c'est-à-dire :

$$(R_6 + ES_6)/S_6 = (R_1 + ES_1)/S_1 = (R_4 + ES_4)/S_4 = (R_5 + ES_5)/S_5 \quad (7)$$

Avec S_1, S_4, S_5 et S_6 les surfaces des bassins en m^2

Afin de déterminer tous les paramètres il est nécessaire de faire une hypothèse.

Hypothèse : Il existe un coefficient c tel que :

$$Q_{D5}' = c * Q_{D5} \quad (8)$$

$$Q_{D6}' = c * Q_{D6} \quad (9)$$

Avec Q_{D5}' , Q_{D5} , Q_{D6}' et Q_{D6} en m^3/j
et c un coefficient représentant la part d'eau arrivant au lac 4

Le coefficient c est déterminé par solveur et les équations sont résolues. Le bilan de chaque lac est équilibré.

Ce bilan va permettre :

- ◆ D'étudier les transferts d'eau entre les lacs,
- ◆ D'estimer les apports en eau des bassins vers les lacs (ruissellement et écoulements souterrains).

5.2.2. Estimation des apports mensuels des bassins vers les lacs

Afin de faire des recommandations sur la production journalière vis-à-vis du stockage, il faut connaître les apports mensuels des bassins vers les lacs. Le bilan « à l'instant T » permet de savoir que les apports des bassins vers les lacs sont répartis sur l'année (voir 6.2.1, p45), ce n'est pas parce qu'il ne pleut pas que le lac ne reçoit aucun apport. Les données disponibles ne permettent pas de faire des bilans hydrologiques mensuels des lacs. Cependant, les prélèvements de la JIRAMA, la pluviométrie et l'évaporation mensuels sont connus de mars 2012 à octobre 2017 et permettent de calculer :

$$QMmin = Q_P - P_{LAC} + EV \quad (10)$$

Avec tous les paramètres en $m^3/mois$

QMmin correspond à l'apport mensuel minimum que les bassins ont apporté aux lacs, soit exactement la production journalière moins les précipitations sur les lacs plus l'évaporation des lacs. Ce calcul ne prend pas en compte les éventuelles variations de stock.

Ceci permet de connaître l'apport minimum moyen (noté **QMmin_{moyen}**) pour les 12 mois de l'année, l'apport minimum moyen de janvier est la moyenne de **QMmin** des mois de janvier de 2013 à 2017. Ceci permet d'avoir une distribution annuelle des apports « type ».

Pour chaque type d'année (année moyenne et années de sécheresse), les apports mensuels des bassins vers les lacs sont ensuite ajustés par solveur pour correspondre aux résultats du bilan annuel (partie 5.1).

Pour chaque scénario et chaque situation type d'année/production journalière, chaque mois la quantité d'eau disponible est comparée aux prélèvements, lorsque les prélèvements sont supérieurs à l'eau disponible le stockage des lacs compense. La somme du volume que les lacs doivent fournir est appelé volume manquant, si ce volume est supérieur au volume de stockage, la capacité de stockage est insuffisante pour une production journalière stable. Dans cette partie le volume de stockage maximum est considéré (lac 3 et 4 pleins).

L'objectif de cette partie est de savoir si le stockage limite la production journalière plus que la ressource.

5.3. Station de production

Chaque étape de traitement est étudiée, l'objectif est d'analyser le dimensionnement de la station afin de connaître ses limites de production journalière.

6. Résultats

6.1. Quantité d'eau disponible

Les résultats présentés dans cette partie concernent uniquement la ressource, le stockage est abordé en 6.2, page 45. Il faut aussi considérer le fait que d'autres acteurs de l'eau sont présents sur les bassins (agriculteurs notamment), les consommations de ces activités ne sont pas connues mais doivent être prises en compte par la JIRAMA.

6.1.1. Scénario 0 : situation initiale, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station

Dans cette partie, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station. Le bilan hydrologique des trois bassins versants d'une année moyenne (ni sèche, ni humide) pour une production de 1 700 m³/j a été établi (Figure 35).

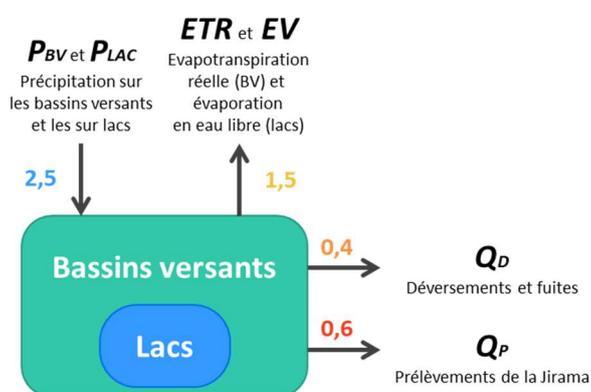


Figure 35 : Bilan hydrologique d'une année moyenne avec un prélèvement journalier de 1 700 m³/j

Résultats pour une année moyenne et une production journalière de 1700 m³ :

- ◆ Les précipitations représentent 2,5 millions de m³,
- ◆ L'évapotranspiration des bassins versants et l'évaporation des lacs représentent 1,5 millions de m³, soit 61% des précipitations,
- ◆ Il y a donc 1 million de m³ d'eau disponible,
- ◆ Les prélèvements s'élèvent à 0,6 millions de m³, soit environ 25% des précipitations et 60% de l'eau disponible,
- ◆ Les fuites et déversements sont donc estimés à 0,4 millions de m³ (14% des précipitations), soit en moyenne 33 000 m³/mois.

Vérification des résultats :

Pour la somme des bassins 1, 2 et 3 on obtient $QA = 1\,031\,875 \text{ m}^3/\text{an}$ avec la formule du CTGREF. Dans le bilan hydrologique présenté précédemment, ces apports annuels correspondent à l'eau disponible, sans prendre en compte la présence du lac, c'est-à-dire :

$$QA' = P_{BV} - ETR \quad (11)$$

Pour la somme des bassins 1, 2 et 3 on obtient $QA' = 995\,141 \text{ m}^3/\text{an}$. Les deux résultats sont très proches, il semblerait que l'eau disponible est légèrement sous-estimée dans le bilan hydrologique.

Afin de connaître les limites de la ressource, plusieurs situations ont été étudiées, en considérant la production journalière et les années de sécheresse. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 13: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 0)

Production journalière (m ³ /j)	Ressource suffisante pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500	Oui	Non	Non	Non
2000	Oui	Oui	Non	Non
1700	Oui	Oui	Non	Non
1500	Oui	Oui	Oui	Non
1000	Oui	Oui	Oui	Non
500	Oui	Oui	Oui	Oui

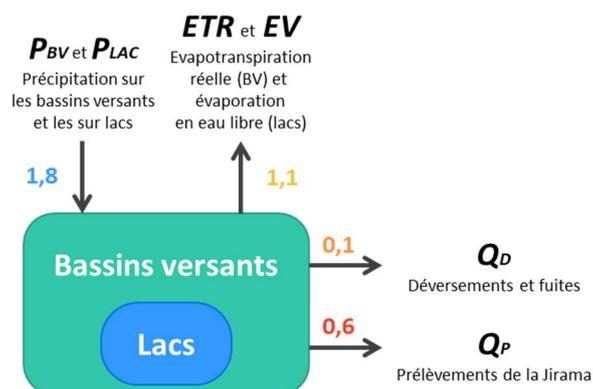
Conclusions :

Pour une année moyenne, la production pourrait être augmentée, cependant cela ne serait pas judicieux. En effet, la production actuelle n'est déjà pas pérenne, dans le cas d'une année de sécheresse décennale (2016-2017) ou centennale (2005-2006) la ressource est insuffisante pour une production journalière stable. C'est-à-dire qu'en cas de sécheresse, la production va chuter en période d'été, en 2017 elle est descendue en-dessous de 400 m³/j.

Afin de fournir un service stable, il faut diminuer la production, à 1500 ou 500 m³/j en fonction du risque accepté, pour pouvoir faire face à une sécheresse. **La ressource limite la production journalière.**

6.1.2. Scénario 1 : seul le bassin versant 1 est conservé

Dans cette partie, seul le bassin versant 1 est conservé, c'est-à-dire que les lacs 2 et 3 ne sont plus utilisés pour l'alimentation de la station. Le bilan hydrologique du bassin versant 1 d'une année moyenne (ni sèche, ni humide) pour une production de 1 700 m³/j a été établi (Figure 36).

Figure 36: Bilan hydrologique du BV1 d'une année moyenne avec un prélèvement journalier de 1 700 m³/j

Résultats pour une année moyenne et une production journalière de 1700 m³ :

- ◆ Les précipitations représentent 1,8 millions de m³,
- ◆ L'évapotranspiration des bassins versants et l'évaporation des lacs représentent 1,1 millions de m³, soit 61% des précipitations,
- ◆ Il y a donc 0,7 million de m³ d'eau disponible,
- ◆ Les prélèvements s'élèvent à 0,6 millions de m³, soit environ 35% des précipitations et 86% de l'eau disponible,
- ◆ Les fuites et déversements sont donc estimés à 0,1 millions de m³ (5% des précipitations), soit en moyenne 8 000 m³/mois.

Afin de connaître les limites de la ressource, plusieurs situations ont été étudiées, en considérant la production journalière et les années de sécheresse. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 14: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 1)

Production journalière (m ³ /j)	Ressource suffisante pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500	Non	Non	Non	Non
2000	Non	Non	Non	Non
1700	Oui	Non	Non	Non
1500	Oui	Non	Non	Non
1000	Oui	Oui	Oui	Non
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Avec la production journalière actuelle (1700 m³/j), la ressource est insuffisante à partir d'une sécheresse quinquennale. Si les barrages 2 et 3 ne sont pas réhabilités, il faut baisser la production journalière à 1000 ou 500 m³/j en fonction du risque accepté, afin de fournir un service stable.

6.1.3. Scénario 2 : les bassins versants 1 et 2 sont conservés

Dans cette partie, les bassins versants 1 et 2 sont conservés, c'est-à-dire que le lac 3 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station. Le bilan hydrologique des bassins versants 1 et 2 d'une année moyenne (ni sèche, ni humide) pour une production de 1 700 m³/j a été établi (Figure 37).

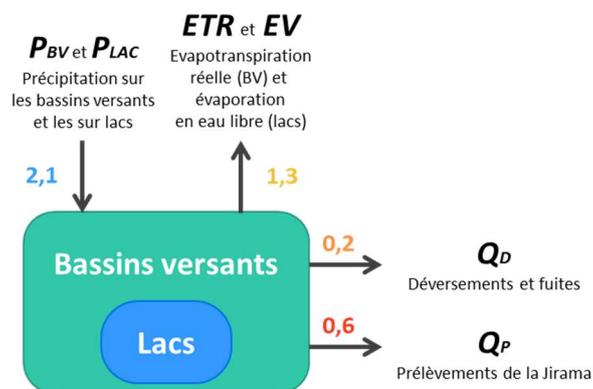


Figure 37: Bilan hydrologique des BV1 et BV2 d'une année moyenne avec un prélèvement de 1 700 m³/j

Résultats pour une année moyenne et une production journalière de 1700 m³ :

- ◆ Les précipitations représentent 2,1 millions de m³,
- ◆ L'évapotranspiration des bassins versants et l'évaporation des lacs représentent 1,3 millions de m³, soit 60% des précipitations,
- ◆ Il y a donc 0,8 million de m³ d'eau disponible,
- ◆ Les prélèvements s'élèvent à 0,6 millions de m³, soit environ 30% des précipitations et 75% de l'eau disponible,
- ◆ Les fuites et déversements sont donc estimés à 0,2 millions de m³ (10% des précipitations), soit en moyenne 16 000 m³/mois.

Afin de connaître les limites de la ressource, plusieurs situations ont été étudiées, en considérant la production journalière et les années de sécheresse. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 15: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 2)

Production journalière (m ³ /j)	Ressource suffisante pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500	Non	Non	Non	Non
2000	Oui	Non	Non	Non
1700	Oui	Oui	Non	Non
1500	Oui	Oui	Non	Non
1000	Oui	Oui	Oui	Non
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Avec la production journalière actuelle (1700 m³/j), la ressource est insuffisante à partir d'une sécheresse décennale. Si le barrage 2 n'est pas réhabilité, il faut baisser la production journalière à 1000 ou 500 m³/j en fonction du risque accepté, afin de fournir un service stable.

6.1.4. Scénario 3 : les bassins versants 1 et 3 sont conservés

Dans cette partie, les bassins versants 1 et 3 sont conservés, c'est-à-dire que le lac 2 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station. Le bilan hydrologique des bassins versants 1 et 3 d'une année moyenne (ni sèche, ni humide) pour une production de 1 700 m³/j a été établi (Figure 38).

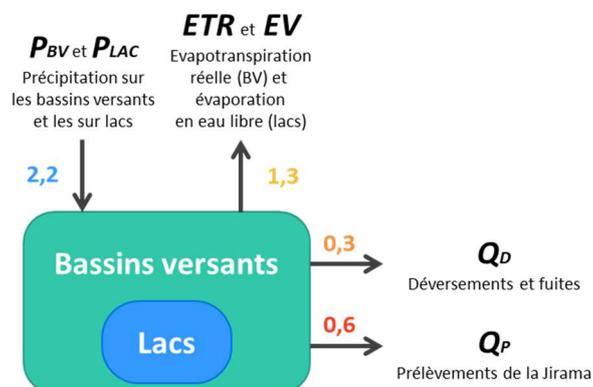


Figure 38: Bilan hydrologique des BV1 et BV3 d'une année moyenne avec un prélèvement de 1 700 m³/j

Résultats pour une année moyenne et une production journalière de 1700 m³ :

- ◆ Les précipitations représentent 2,2 millions de m³,
- ◆ L'évapotranspiration des bassins versants et l'évaporation des lacs représentent 1,3 millions de m³, soit 61% des précipitations,
- ◆ Il y a donc 0,9 million de m³ d'eau disponible,
- ◆ Les prélèvements s'élèvent à 0,6 millions de m³, soit environ 28% des précipitations et 66% de l'eau disponible,
- ◆ Les fuites et déversements sont donc estimés à 0,3 millions de m³ (11% des précipitations), soit en moyenne 24 000 m³/mois.

Afin de connaître les limites de la ressource, plusieurs situations ont été étudiées, en considérant la production journalière et les années de sécheresse. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 16: Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 3)

Production journalière (m ³ /j)	Ressource suffisante pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500	Non	Non	Non	Non
2000	Oui	Non	Non	Non
1700	Oui	Oui	Non	Non
1500	Oui	Oui	Non	Non
1000	Oui	Oui	Oui	Non
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Avec la production journalière actuelle (1700 m³/j), la ressource est insuffisante à partir d'une sécheresse décennale. Si le barrage 3 n'est pas réhabilité, il faut baisser la production journalière à 1000 ou 500 m³/j en fonction du risque accepté, afin de fournir un service stable.

Le *Tableau 17* récapitule les productions journalières maximum que permettent la ressource pour chaque type d'année et chaque scénario.

Tableau 17: Récapitulatif des résultats pour chaque scénario

	Scénario 0	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Année moyenne	2 500	1 700	2 000	2 000
Sécheresse quinquennale	2 000	1 000	1 700	1 700
Sécheresse décennale	1 500	1 000	1 000	1 000
Sécheresse centennale	500	500	500	500

Quel que soit le scénario, la ressource limite la production journalière et la JIRAMA doit la diminuer afin de fournir un service stable au cours des années et des saisons.

6.2. Stockage

Dans cette partie il est considéré que la gestion des lacs est parfaite, toute l'eau qui peut être stockée l'est, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de fuites dans les barrages 4 et 6, et que les conduites de sortie des lacs 4 et 5 ne sont pas ouvertes tant que le lac 1 déborde.

6.2.1. Bilan hydrologique des lacs « à l'instant T »

La *Figure 39* présente le résultat du bilan hydrologique des lacs, les chiffres donnés sont les moyennes journalières entre le 8 et 20 mai 2019, avec $c \approx 0,77$.

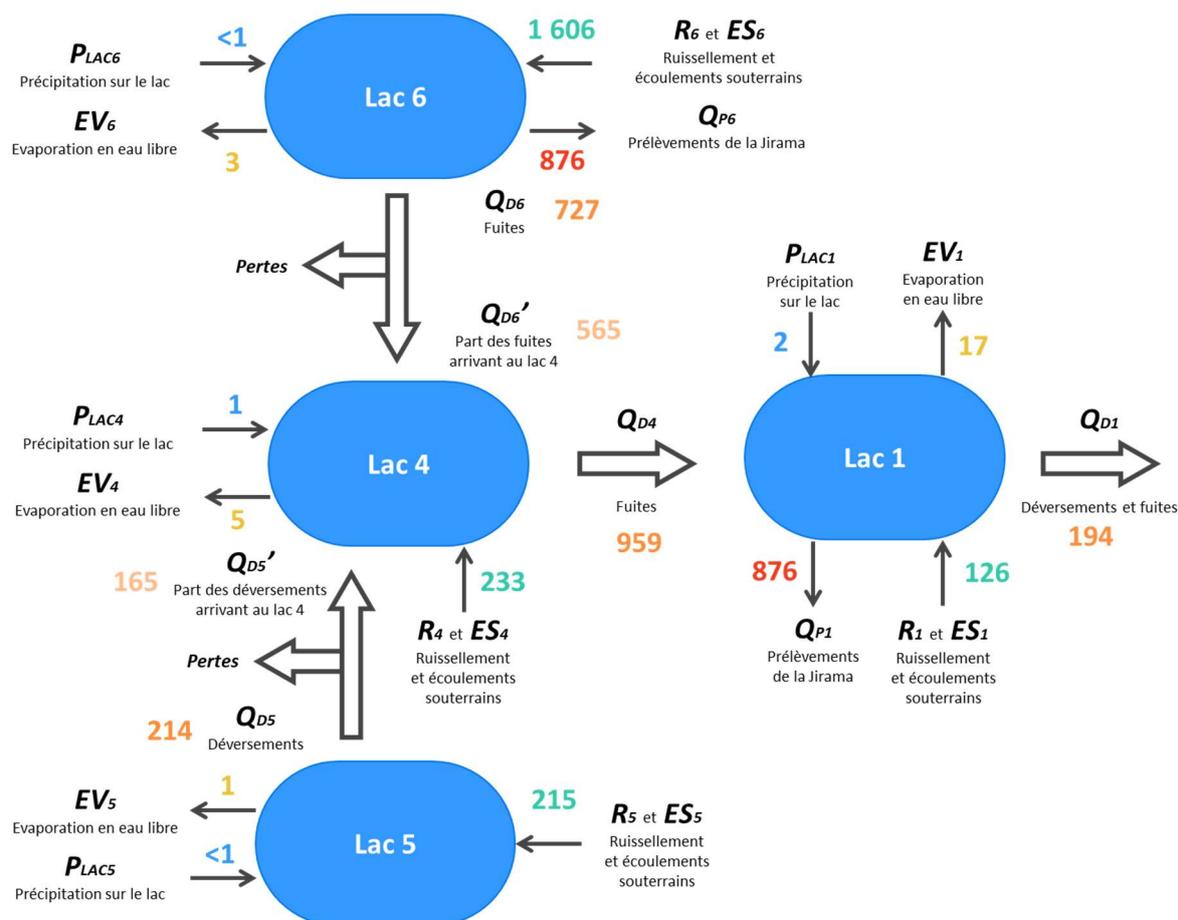


Figure 39: Bilan hydrologique des lacs, moyennes journalières (m³/j) entre le 8 et 20 mai 2019

Résultats :

- ◆ Les barrages 4 et 6 présentent de très grosses fuites, toute cette eau n'est pas perdue, elle « compense » les prélèvements faits sur le lac 1
- ◆ En revanche l'eau déversée par le barrage 1 est perdue, elle aurait pu être stockée
- ◆ Malgré les faibles précipitations du mois de mai les ruissellements et écoulements souterrains sont assez importants, **les apports des bassins versants vers les lacs sont donc répartis sur l'année**

6.2.2. Estimation des apports mensuels des bassins versants vers les lacs

6.2.2.1 Scénario 0 : situation initiale, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station

Dans cette partie, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station. Le *Tableau 18* présente l'exemple de l'ajustement des apports mensuels pour une année moyenne.

Tableau 18 : Eau disponible pour une année moyenne, sur les trois bassins versants

	Distribution type (m ³)	Apports ajustés par solveur (m ³)
Novembre	73 409	76 667
Décembre	81 495	85 392
Janvier	75 446	78 900
Février	82 569	86 407
Mars	91 617	96 606
Avril	90 589	95 568
Mai	87 396	92 006
Juin	83 832	88 085
Juillet	81 389	85 392
Août	73 431	76 668
Septembre	62 419	64 822
Octobre	59 742	61 924
Année	943 333	988 438
Résultat bilan annuel	988 438	988 438
Différence	- 45 105	-

Le *Tableau 19* présente l'exemple de la comparaison de la quantité d'eau disponible avec les prélèvements pour une année moyenne et une production journalière de 2500 m³.

Tableau 19 : Comparaison de l'eau disponible avec les prélèvements journaliers pour une année moyenne et une production journalière de 2500 m³/j sur les trois bassins versants

Mois	Eau disponible - prélèvements	Mois	Eau disponible - prélèvements
Novembre	1 667	Mai	14 506
Décembre	7 892	Juin	13 085
Janvier	1 400	Juillet	7 892
Février	16 407	Août	- 832
Mars	19 106	Septembre	- 10 178
Avril	20 568	Octobre	- 15 576
Volume manquant		26 586	

Le volume de stockage des lacs étant de 24 800 m³, le stockage ne permet pas une production journalière de 2500 m³ lors d'une année moyenne.

Le *Tableau 20* présente toutes les situations, les cases rouges sont les situations limitées par la ressource.

Tableau 20 : Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 0)

Production journalière (m ³ /j)	Stockage suffisant pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500	Non			
2000	Oui	Oui		
1700	Oui	Oui		
1500	Oui	Oui	Oui	
1000	Oui	Oui	Oui	
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Dans la majorité des cas, **le stockage ne limite pas la production plus que la ressource.**

6.2.2.2 Scénario 1 : seul le bassin versant 1 est conservé

Dans cette partie, seul le bassin versant 1 est conservé, c'est-à-dire que les lacs 2 et 3 ne sont plus utilisés pour l'alimentation de la station. Le Tableau 21 présente toutes les situations, les cases rouges sont les situations limitées par la ressource.

Tableau 21 : Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 1)

Production journalière (m ³ /j)	Stockage suffisant pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500				
2000				
1700	Oui			
1500	Oui			
1000	Oui	Oui	Oui	
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Dans toutes les situations, **le stockage ne limite pas la production plus que la ressource.**

6.2.2.3 Scénario 2 : les bassins versants 1 et 2 sont conservés

Dans cette partie, les bassins versants 1 et 2 sont conservés, c'est-à-dire que le lac 3 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station. Le Tableau 22 présente toutes les situations, les cases rouges sont les situations limitées par la ressource.

Tableau 22 : Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 2)

Production journalière (m ³ /j)	Stockage suffisant pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500				
2000	Oui			
1700	Oui	Oui		
1500	Oui	Oui		
1000	Oui	Oui	Oui	
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Dans toutes les situations, **le stockage ne limite pas la production plus que la ressource.**

6.2.2.4 Scénario 3 : les bassins versants 1 et 3 sont conservés

Dans cette partie, les bassins versants 1 et 3 sont conservés, c'est-à-dire que le lac 2 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station. Le Tableau 23 présente toutes les situations, les cases rouges sont les situations limitées par la ressource.

Tableau 23 : Résumé de différentes situations production journalière/sécheresse (scénario 3)

Production journalière (m ³ /j)	Stockage suffisant pour une production journalière stable			
	Année moyenne	Sécheresse quinquennale	Sécheresse décennale	Sécheresse centennale
2500				
2000	Oui			
1700	Oui	Oui		
1500	Oui	Oui		
1000	Oui	Oui	Oui	
500	Oui	Oui	Oui	Oui

Conclusion :

Dans toutes les situations, **le stockage ne limite pas la production plus que la ressource.**

Quel que soit le scénario étudié, le stockage ne limite pas la production journalière plus que la ressource. Augmenter la capacité de stockage, par la construction d'un nouveau barrage par exemple, ne permettra pas d'augmenter la production journalière.

6.3. Station de production

Le détail du dimensionnement de chaque étape de traitement est donné dans les parties suivantes. Les données utilisées pour les calculs de dimensionnement sont issues des « fiches dimensionnement » du cours de traitement des eaux de distribution de deuxième année de l'ENGEES.

6.3.1. Réactifs de prétraitement (sulfate d'alumine et chaux)

Les réactifs sont préparés deux fois par jour mais le bac de préparation de la chaux amont ne permet pas une autonomie de 12h pour le débit d'injection théorique (voir Tableau 24).

Tableau 24: Autonomie des bacs de préparation des réactifs

	Chaux amont	Sulfate d'alumine
Volume bac (L)	306	525
Débit d'injection théorique (L/h)	50	42
Autonomie bac (h)	6,1	12,5

Le débit d'injection réel de la chaux doit donc être bien inférieur à 50 L/h si les agents de station n'ont besoin de préparer la solution que deux fois par jour. Pour atteindre le débit d'injection théorique il faut mettre en place un système de dosage du débit, dans ce cas il faudra soit préparer la solution quatre fois par jour, soit agrandir le bac de préparation de la chaux.

6.3.2. Coagulation - Flocculation

Les temps de séjour nécessaires à la coagulation et à la flocculation sont respectivement de 1 à 2 minutes et de 15 à 30 minutes. En connaissant leurs dimensions, il est possible de calculer la production journalière maximum de chaque ouvrage (voir Tableau 25).

Tableau 25: Production journalière max pour la coagulation et la flocculation

	Coagulation	Flocculation
Volume total (m ³)	1,6	33,4
Temps de séjour	1 à 2 minutes	15 à 30 minutes
Production journalière max (m ³ /j)	2300	3200

En 2018 la production journalière maximale était de 1950 m³/j, la coagulation et la flocculation sont donc bien dimensionnées.

6.3.3. Décantation

Pour un décanteur statique, la vitesse de décantation est de 0,5 à 1 m/h. En connaissant la surface de chaque décanteur, il est possible de calculer leur production journalière maximum (voir Tableau 26).

Tableau 26: Production journalière max des décanteurs

	Décanteur 1	Décanteur 2
Surface (m ²)	63	89
Vitesse ascensionnelle (m/h)	0,5 à 1	0,5 à 1
Production journalière max (m ³ /j)	1500	2140

Au total, les décanteurs peuvent traiter jusqu'à 3 640 m³/j. En 2018 la production journalière maximale était de 1950 m³/j, les décanteurs sont donc bien dimensionnés.

6.3.4. Filtration

Les vitesses de filtration usuelles varient de 7 à 8 m/h pour une filtration rapide. La surface de filtration totale est de 90 m², mais pour prendre en compte le lavage des filtres (un par jour) seuls deux filtres seront considérés dans les calculs de dimensionnement, soit une surface de filtration de 60 m². Dans ce cas, la production journalière maximum est de 11 500 m³/j. En 2018 la production journalière maximale était de 1950 m³/j, les filtres sont donc bien dimensionnés.

6.3.5. Désinfection – Neutralisation

Les réactifs sont préparés deux fois par jour mais le bac de préparation de l'hypochlorite de calcium ne permet pas une autonomie de 12h pour le débit d'injection théorique (voir Tableau 27).

Tableau 27: Autonomie des bacs de préparation des réactifs

	Chaux aval	Hypochlorite de calcium
Volume bac (L)	1180	500
Débit d'injection théorique (L/h)	50	42
Autonomie bac (h)	23,6	11,9

Un système de régulation du débit d'injection de l'hypochlorite censé fournir 42 L/h est en place. Cependant, le débit d'injection réel de l'hypochlorite de calcium doit être inférieur à 42 L/h si les agents de station n'ont besoin de préparer la solution que deux fois par jour. Si le débit théorique est atteint il faudra soit préparer la solution trois fois par jour, soit agrandir le bac de préparation de l'hypochlorite.

En conclusion, le dimensionnement de la station permet de traiter jusqu'à 2 300 m³/j, elle ne limite donc pas la production journalière plus que la ressource.

7. Conclusion et perspectives

La JIRAMA, qui est en charge de la gestion du réseau d'eau potable de la commune urbaine de Fianarantsoa, souhaite diminuer les prélèvements sur une de ses trois ressources, le pompage d'Ankidona (17% de la production totale), afin de réduire ses coûts d'exploitation. L'étude de 2018 portant sur le lac d'Antarambiby (61% de la production totale) a montré des possibilités d'augmentation des prélèvements sur ce lac, mais insuffisantes pour remplacer la station de pompage. La dernière ressource est constituée des 6 lacs artificiels de Vatosola, la production du site (22% de la production totale) est très instable en fonction des années et des saisons, de 370 m³/j à 2700 m³/j (de janvier 2013 à décembre 2018).

La JIRAMA a souhaité étudier les possibilités d'augmentation de production de Vatosola tout en la stabilisant au cours des années et des saisons. Par manque de moyens de la JIRAMA, le programme Eaurizon a pris en charge cette étude qui a été séparée en trois parties : la ressource, le stockage et la station de production. Pour les deux premières parties, quatre scénarios ont été étudiés :

- ◆ Scénario 0 : situation initiale, tous les lacs sont utilisés pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 1 : seul le bassin versant 1 est conservé, les lacs 2 et 3 ne sont plus utilisés pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 2 : les bassins versants 1 et 2 sont conservés, le lac 3 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station,
- ◆ Scénario 3 : les bassins versants 1 et 3 sont conservés, le lac 2 n'est plus utilisé pour l'alimentation de la station.

Au terme de l'étude, les conclusions sont les suivantes :

Concernant la ressource :

- ◆ L'instabilité de la production journalière de Vatosola s'explique par la surexploitation de la ressource, lors de sécheresses la quantité d'eau disponible sur l'année ne permet pas un prélèvement journalier de 1700 m³/j (production journalière moyenne actuelle),
- ◆ Afin de fournir un service stable, il est conseillé à la JIRAMA de diminuer ses prélèvements journaliers.

Concernant le stockage :

- ◆ Deux des six barrages (numéros 2 et 3) ne sont plus utilisés pour l'alimentation de la station,
- ◆ Parmi les barrages restants, deux (numéros 4 et 6) présentent des fuites importantes, respectivement 727 m³/j et 959 m³/j en moyenne pour mai 2019,
- ◆ Le manque de données n'a pas permis une étude précise du stockage,
- ◆ Le volume de stockage actuel, de 24 800 m³ sur les 6 lacs, ne limite pas la production journalière plus que la ressource,
- ◆ Augmenter le volume de stockage ne permettra pas d'augmenter la production journalière.

Concernant la station de production :

- ◆ En termes de dimensionnement des ouvrages, la station peut traiter jusqu'à 2300 m³/j,
- ◆ La station ne limite pas la production journalière plus que la ressource.

La conclusion générale de l'étude est que Vatosola ne peut pas remplacer la ressource d'Ankidona ni permettre une réduction de son utilisation. Si la JIRAMA ne souhaite plus utiliser la station de pompage, elle doit chercher une nouvelle ressource. Diminuer les fuites sur le réseau permettrait aussi de réduire les prélèvements à Ankidona.

Pour chaque scénario étudié, des recommandations de production journalière ont été faites vis-à-vis du stockage et de la ressource (en fonction du risque que la JIRAMA accepte), le *Tableau 28* présente les résultats.

Tableau 28: Récapitulatif des résultats pour chaque scénario

		Scénario 0	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Barrages à réhabiliter		2 et 3	-	2	3
Production journalière conseillée pour assurer un service stable en fonction du risque accepté (m ³ /j)	Sécheresse décennale	1500	1000	1000	1000
	Sécheresse centennale	500	500	500	500

Les barrages doivent faire l'objet d'un diagnostic de leur génie civil poussé afin de connaître les nécessités et coûts des travaux. Ceci permettra à la JIRAMA de décider quels barrages réhabiliter en fonction du coût et des bénéfices apportés. Dans tous les cas les fuites des barrages 4 et 6 doivent être réparées.

Concernant la gestion du site, plusieurs recommandations peuvent être faites :

- ◆ Les barrages et les berges des lacs doivent être entretenus régulièrement (élagage, désherbage...),
- ◆ Des échelles limnimétriques doivent être installées sur tous les barrages afin de pouvoir suivre leurs variations de stock,
- ◆ Des compteurs doivent être installés sur les conduites entre les barrages et la station, ceci permettra de connaître exactement le débit prélevé à chaque lac et les pertes d'eau à la station.

La principale difficulté rencontrée durant cette étude est le manque d'informations et de données concernant la zone d'étude. La mise en place d'échelles limnimétriques et de compteurs permettra de faire un bilan hydrologique plus précis de chaque lac et donc de connaître les apports réels des bassins vers les lacs au cours des mois.

8. Bibliographie

- [1] Coopération Région Haute-Matsiatra – Métropole de Lyon. Gérer un réseau d'eau potable – Spécialisation sur les réseaux gravitaires sous contrat d'affermage, Programme Eaurizon, avril 2019.
- [2] Schéma directeur eau potable de la commune urbaine de Fianarantsoa, mars 2017.
- [3] D. Dubois. Étude de la ressource en eau du bassin versant d'Antarambiby, Région Haute-Matsiatra, Madagascar, Mémoire d'ingénieur, ENSEGID, septembre 2018.
- [4] G. Cartier. Diagnostic du fonctionnement des usines de production d'eau potable de Tombana et Soarana et propositions d'améliorations, novembre 2018.
- [5] Madagascar : essai de carte géomorphologique, Scale of 1 : 1 000 000. IRD (éditeur) 2014. Date of publication: 1957. Project NumeriSud SPHAERA-GEO. Bondy, France.
- [6] Carte pédologique de Madagascar. Scale of 1 : 1 000 000. IRD (éditeur) 2014. Date of publication: 1968. Project NumeriSud SPHAERA-GEO. Bondy, France.
- [7] P. Chaperon, J. Danloux, Luc Ferry. Fleuves et rivières de Madagascar, Edition de l'Orstom, 1993.
- [8] FAO. Evaporation from artificial lakes and reservoirs, AQUASTAT Programme, 2015.
- [9] J.P. Amigues, P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs). Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 2006.
- [10] R.G. Allen, M. Smith, L.S. Pereira, W.O.. Pruitt Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements, aout 1997.
- [11] Aldegheri. Projet de réhabilitation des petits périmètres irrigués, Etude hydrologique des PPI, 1985.

9. Annexes

9.1. Annexe 1

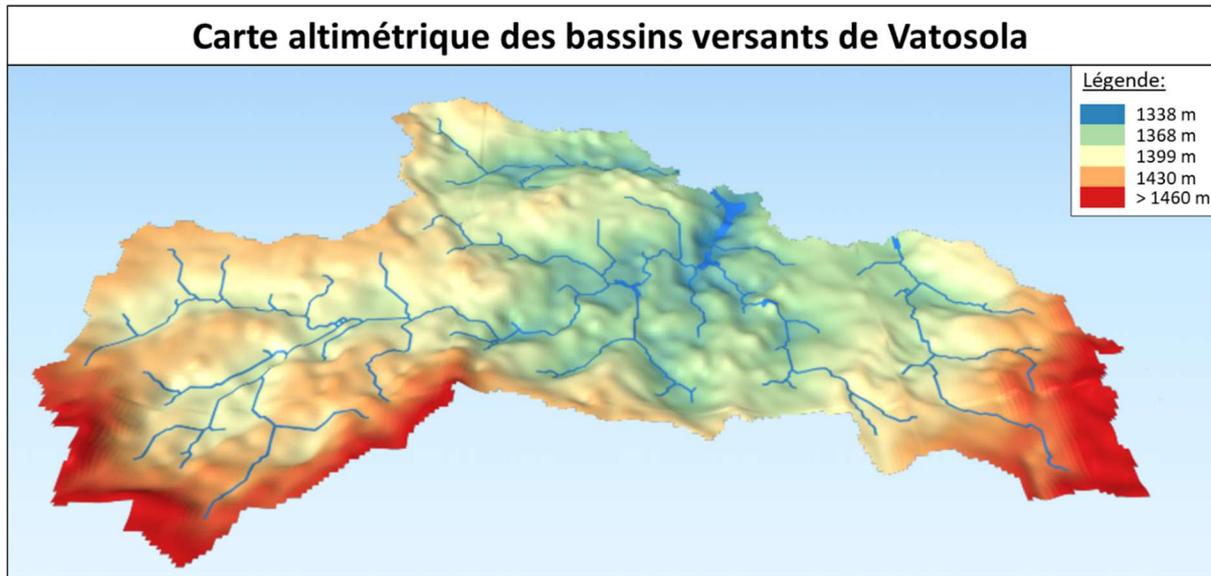


Figure 40: Carte altimétrique des bassins versants de Vatosola obtenue grâce au module QGis « qgis2threejs »

9.2. Annexe 2

	Stade de Croissance			
	Initial	Développement	Mi-saison	Tardif
Agrume	0.75	0.75	0.75	0.75
Arachide	0.40	0.78	1.15	0.60
Banane	1.00	1.00	1.00	1.00
Betterave sucrière	0.35	0.78	1.20	0.70
Blé	0.40	0.78	1.15	0.30
Cacao	1.00	1.00	1.00	1.00
Café	1.00	1.00	1.00	1.00
Canne à sucre	1.00	1.00	1.00	1.00
Caoutchouc	1.00	1.00	1.00	1.00
Coton	0.35	0.78	1.20	0.60
Colza	0.35	0.73	1.10	0.35
Cultures oléagineuses	0.35	0.75	1.15	0.35
Fibres textiles	0.35	0.68	1.00	0.60
Fourrage	0.40	0.70	1.00	0.90
Fruit	0.75	0.75	0.75	0.75
Légumes	0.60	0.85	1.10	0.90
Légumes secs	0.40	0.78	1.15	0.55
Maïs	0.30	0.75	1.20	0.60
Manioc	0.60	0.85	1.10	0.90
Millet	0.30	0.65	1.00	0.30
Noix de coco	1.00	1.00	1.00	1.00
Orge	0.30	0.73	1.15	0.25
Palme	1.00	1.00	1.00	1.00
Patate douce	1.00	1.00	1.00	1.00
Plantain	1.00	1.00	1.00	1.00
Pomme de terre	0.50	0.83	1.15	0.75
Riz	1.20	1.15	1.10	0.80
Sésame	0.35	0.73	1.10	0.25
Soja	0.40	0.78	1.15	0.50
Sorgho	0.30	0.70	1.10	0.55
Tabac	0.50	0.85	1.20	0.80
Thé	1.05	1.05	1.05	1.05
Autres racines	1.00	1.00	1.00	1.00
Autres céréales	1.00	1.00	1.00	1.00
Tourmesol	0.35	0.73	1.10	0.35

Figure 41: Coefficient cultural pour différent stade de croissance de différentes cultures, source : FAO

9.3. Annexe 3

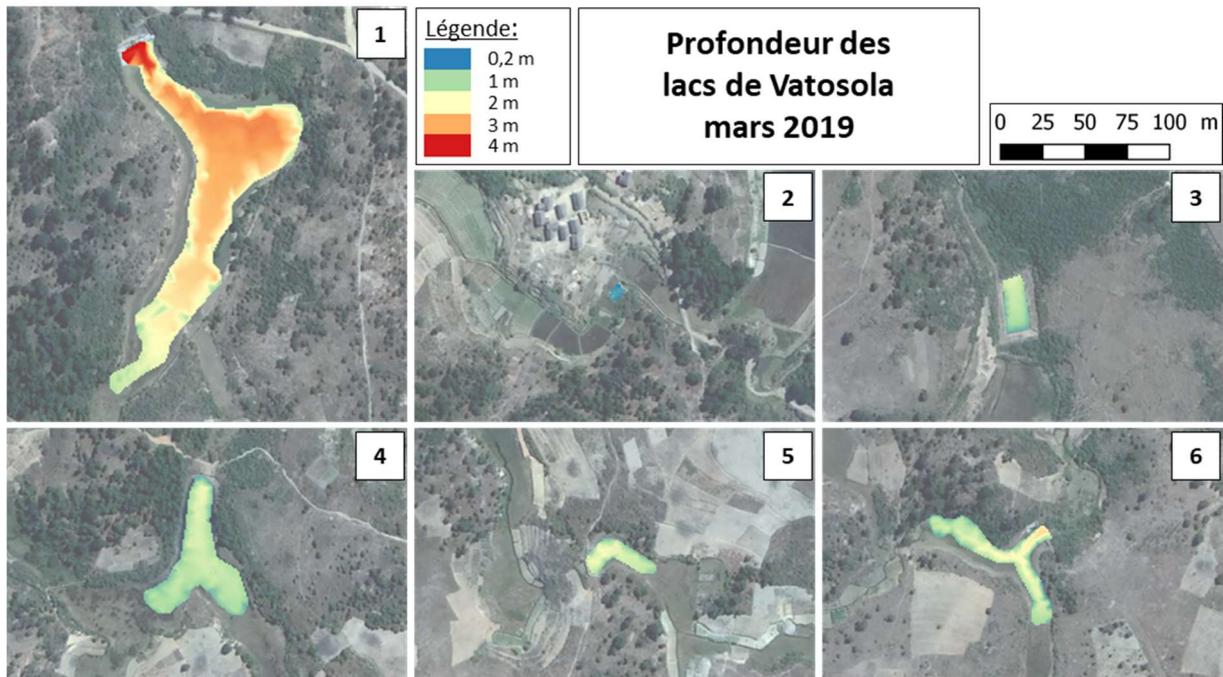


Figure 42: Résultat de l'interpolation des mesures sous QGis

9.4. Annexe 4

Tableau 29: Résultats de la campagne de mesure effectuée du 8 au 20 mai 2019

Date (mai 2019)	Barrage 1			Barrage 4	Barrage 5	Barrage 6			Production journalière (m ³ /j)
	Hauteur d'eau (m)	Débit de fuite (L/s)	Débit de fuite journalière	Hauteur d'eau (m)	Hauteur d'eau (m)	Hauteur d'eau (m)	Débit de fuite (L/s)	Débit de fuite journalière (m ³ /j)	
8	3,97	3,61	312,29	0,5	1,75	0,5	9,37	810,00	1757
9	3,97	4,23	365,59	0,52	1,75	0,5	9,68	836,13	1766
10	3,97	3,99	344,68	0,54	1,75	0,5	9,68	836,13	1768
11	3,97	3,90	337,06	0,54	1,75	0,5	9,12	787,84	1755
12	3,97	4,01	346,52	0,54	1,75	0,5	9,37	810,00	1747
13	3,97	3,82	330,19	0,52	1,75	0,48	9,15	790,24	1695
14	3,97	1,17	101,13	0,51	1,75	0,48	8,57	740,57	1780
15	3,97	0,87	75,44	0,51	1,75	0,48	8,26	714,05	1748
16	3,97	1,16	100,39	0,51	1,75	0,48	6,93	598,61	1766
17	3,97	1,17	101,09	0,51	1,75	0,48	7,04	608,45	1726
18	3,95	0,41	35,38	0,51	1,75	0,48	7,67	662,92	1784
19	3,95	0,12	10,55	0,52	1,75	0,48	6,99	604,20	1734
20	3,97	0,88	76,01	0,5	1,75	0,48	7,59	656,20	1746
Moyenne	3,97	2,26	195,10	0,52	1,75	0,49	8,42	727,33	1 752

Mémoire de fin d'études

Diplôme : Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES

Spécialité : Exploitation et Travaux

Auteur : BOUF-WAGNER Alix

Année : 2019

Titre :

**Etude de la ressource en eau et de la station de production associée
Commune urbaine de Fianarantsoa, Madagascar**

Nombre de pages : 58, **Texte** 54 pages, **Annexes** 4 pages

Nombre de références bibliographiques : 11

Structure d'accueil : Métropole de Lyon – Décentralisation à Madagascar. Fianarantsoa, Madagascar

Maître de stage : SIMON François

Résumé

La Région Haute Matsiatra et la Métropole de Lyon sont en coopération décentralisée pour un appui sur les secteurs de l'eau, de l'assainissement et de l'hygiène.

La ressource en eau de Vatosola (22% de la production de Fianarantsoa) est constituée de six petits barrages, créant six lacs artificiels. La station de production est située à côté des barrages et dessert la ville en gravitaire.

Cette étude a pour but de savoir s'il est possible d'augmenter et de stabiliser au cours du temps la production à Vatosola.

La conclusion de l'étude est qu'il n'est pas possible d'augmenter la production de Vatosola.

Mots-clés :

Gestion de la ressource, Bassin versant, Bilan hydrologique, Station de production, Lac, Barrage, Madagascar