



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

DOMAINE : SCIENCE DE L'INGENIEUR

Mention : Ingénierie Minière



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN INGENIERIE MINIERE

Parcours : Sciences et Techniques Minières

Intitulé :

**MODELISATION HYDROLOGIQUE PAR WEAP21
POUR UNE GESTION INTEGREE DES RESSOURCES
EN EAU : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA
LOKOHO (Nord-est de Madagascar)**

Présenté par

ANDRIANARIVONY Andoniaina

Devant les membres du jury composés de :

Président : Mr RANAIVOSON Léon Felix, Responsable de Mention Ingénierie Minière, ESPA

Rapporteur : Mr RALAIMARO Joseph, Maître de Conférences, ESPA

Examineurs : Mr RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Maître de Conférences, ESPA

Mr ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija, Enseignant-Chercheur, ESPA

Le 09 Septembre 2016

Promotion : 2014-2015



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

DOMAINE : SCIENCE DE L'INGENIEUR

Mention : Ingénierie Minière



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN INGENIERIE MINIERE

Parcours : Sciences et Techniques Minières

Intitulé :

**MODELISATION HYDROLOGIQUE PAR WEAP21
POUR UNE GESTION INTEGREE DES RESSOURCES
EN EAU : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA
LOKOHO (Nord-est de Madagascar)**

Présenté par

ANDRIANARIVONY Andoniaina

Devant les membres du jury composés de :

Président : Mr RANAIVOSON Léon Felix, Responsable de Mention Ingénierie Minière, ESPA

Rapporteur : Mr RALAIMARO Joseph, Maître de Conférences, ESPA

Examineurs : Mr RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier, Maître de Conférences, ESPA

Mr ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija, Enseignant-Chercheur, ESPA

Le 09 Septembre 2016

Promotion : 2014-2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la santé et le courage durant la réalisation de ce mémoire.

Grâce au soutien et à la collaboration de plusieurs personnes ressources, j'ai pu accomplir de grandes choses et arriver au terme de ce travail. Je voudrai ainsi témoigner ma sincère satisfaction et mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, tout particulièrement à :

- **Monsieur ANDRIANARISON Yvon**, Responsable de Domaine Science de l'Ingénieur, pour ses efforts qui a permis d'assurer le bon fonctionnement de l'école et pour nous, d'avoir pu mener nos études à bien ;
- **Monsieur RANAIVOSON Léon Felix**, Responsable de Mention Ingénierie Minière, pour ses soutiens pédagogique et administratif, grâce auxquels le présent mémoire a pu être établi et soutenu ;
- **Monsieur RALAIMARO Joseph**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour son encadrement sans faille, depuis la formulation du sujet jusqu'à l'élaboration complète du présent mémoire. J'ai pu ainsi bénéficier de ses expériences et de ses précieux conseils.
- **Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a fait l'honneur d'être l'Examineur de ce présent mémoire ;
- **Monsieur ANDRIAMBOAVONJY Mamy Rija**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a fait l'honneur d'être l'Examineur de ce mémoire. Ses conseils m'ont beaucoup aidé dans la réalisation de ce mémoire.
- tous les Enseignants-formateurs qui m'ont formé durant ces cinq années d'études à l'ESPA.

Aussi, voudrai-je adresser ma reconnaissance envers mes collègues de l'Ecole pour leur aimable collaboration.

Enfin, merci à toute ma famille, en particulier mes parents, mon frère, ma sœur ainsi que mes amis pour leur soutien moral et financier.

REMERCIEMENTS

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

GLOSSAIRE

INTRODUCTION

**PREMIER CHAPITRE : CONCEPT DE BASE ET ETUDES ANALYTIQUES
DES RESSOURCES EN EAU**

I-1 LES DIFFERENTS TYPES DE RESSOURCES EN EAU

I-2 GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

I-3 BASSIN VERSANT

DEUXIEME CHAPITRE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II-1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

II-2 CONTEXTE CLIMATIQUE

II-3 HYDROGRAPHIE-HYDROGEOLOGIE

II-4 CONTEXTE GEOLOGIQUE

II-5 CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

**TROISIEME CHAPITRE : MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN
VERSANT DE LA LOKOHO**

III-1 PRESENTATION DU LOGICIEL WEAP21

III-2 APPLICATION DU MODELE « WEAP21 » AU BASSIN VERSANT DE LA
LOKOHO

**QUATRIEME CHAPITRE : PRESENTATION DES RESULTATS ET
INTEPRETATIONS**

IV-1 PRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DU MODELE

IV-2 CLIMATS

IV-3 DISTRIBUTIONS ET RESSOURCES

IV-4 DEMANDE ET BESOINS EN EAU

IV-5 QUALITE DE L'EAU

**CINQUIEME CHAPITRE : ORIENTATIONS STRATEGIQUES EN MATIERE
DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU**

V-1 CHANGEMENT DES PRIORITES DE L'ALLOCATION DE LA DEMANDE

V-2 RECYCLAGE DE L'EAU

V-3 DESALINISATION

V-4 OUTILS DE MISE EN ŒUVRE DE LA GIRE

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AEP :	Adduction d'Eau Potable
AEPG :	Adduction d'Eau Par Gravitaire
ANDEA :	Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement
APD :	Avant-Projet Détaillé
AQUASTAT :	Statistique de la FAO
AUE :	Associations des Usagers de l'Eau
BD500 :	Base de Données au 1/500.000 ^{ème}
BV :	Bassin Versant
CEG :	Collège d'Enseignement Général
CHD :	Centre Hospitalier de District
CILF :	Conseil International de la Langue Française
CPE :	Comités des Points d'Eau
CSB :	Centre de Santé de Base
DEA :	Direction de l'Eau et de l'Assainissement
DRA :	Direction Régionale de l'Agriculture
E :	Evaporation
ECR :	cabinet d'Etudes, de Conseils et d'assistance à la Réalisation
EIES :	Etude d'Impact Environnemental et Social
EPP :	Ecole Primaire Publique
ESPA :	Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
ETP :	EvapoTranspiration Potentielle
ETR :	EvapoTranspiration Réelle
ETRéf :	EvapoTranspiration de Référence
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et Agriculture
FTM :	Foibe Taon-tsaritanin'i Madagasikara
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GWP :	Partenariat Mondial de l'Eau
GWV :	Grounds Water Windows
hab :	Habitant
IEC :	Information, Education et Communication
JIRAMA :	Ji-ro sy RA-no Malagasy
Kc :	Coefficient de culture
MAEP :	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MECIE :	Mise En Compatibilité des Investissements avec l'Environnement
MES :	Matière En Suspension
Min SAN :	Ministère Santé
N :	Nord
NGM :	Nivellement Général de Madagascar
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM :	Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
P :	Précipitations
PADANE :	Projet d'Amélioration et de Développement Agricoles dans le Nord-Est

PAE :	Plan d'Action Environnementale
PAEAR :	Projet d'Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Rural
PANA :	Plan d'Action National d'Adaptation
PAR :	Plan d'Action de Recasement
pH :	Potentiel Hydrogène
PNAEPA :	Programme National d'Alimentation en Eau Potable et d'Assainissement
PNE :	Politique Nationale de l'Environnement
PNLCC :	Politique Nationale de la Lutte contre le Changement Climatique
PNLCD :	Politique Nationale de Lutte Contre la Désertification
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PSNA :	Politique et Stratégie Nationale pour l'Assainissement
SAVA :	Sambava-Antalaha-Vohémar-Andapa
SDAGIRE :	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
SEI :	Institut de l'Environnement de Stockholm
SIG :	Système d'Information Géographique
SISG :	Service des Informations Sanitaires pour la Gestion
SOGREAH :	SOciété GREnoboise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
T :	Température
UNESCO :	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
USAID :	Agence des Etats-Unis pour le Développement International
WEAP :	Water Evaluation And Planning System
ZCIT :	Zone de Convergence InterTropicale

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Origine des eaux souterraines selon le cycle de l'eau	6
Figure 2 : Cycle de planification du plan GIRE.....	8
Figure 3 : Un bassin versant.....	10
Figure 4 : Distinction entre bassin versant topographique et hydrogéologique.....	11
Figure 5 : Localisation du bassin versant de la Lokoho.....	13
Figure 6 : Carte isohyète du bassin versant de Lokoho.....	15
Figure 7 : Carte isotherme du bassin versant de Lokoho et ses environs.....	16
Figure 8 : Diagramme ombrothermique du District d'Andapa	17
Figure 9 : Carte hydrographique du bassin versant de la Lokoho.....	18
Figure 10 : Différents types de systèmes aquifères.....	20
Figure 11 : Carte géologique du bassin versant de Lokoho et ses environs.....	21
Figure 12 : Fenêtre montrant les cinq affichages possibles du modèle.....	32
Figure 13 : Fenêtre d'affichage des résultats du modèle.....	34
Figure 14 : Carte du monde intégrée dans WEAP	42
Figure 15 : Carte du bassin versant de la Lokoho avec les réseaux hydrographiques	42
Figure 16 : Fenêtre de réglage des années et pas de temps	43
Figure 17 : Fenêtre de saisie des données à interpoler.....	45
Figure 18 : Fenêtre de gestion des scénarios.....	46
Figure 19 : Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique », définition de type de climat	47
Figure 20 : Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique », spécification de type de climat ..	48
Figure 21 : Fenêtre montrant les différents scénarios construits.....	49
Figure 22 : Fenêtre de saisie des éléments à modéliser.....	50
Figure 23 : Fenêtre des informations générales sur le bassin versant	51
Figure 24 : Fenêtre « pH » des eaux souterraines	52
Figure 25 : Bassin versant de Lokoho avec les éléments de la modélisation par WEAP	54
Figure 26 : Précipitations mensuelles dans le BV Lokoho	55
Figure 27 : Ruissellement d'eau de pluie par mois	55
Figure 28 : Evapotranspiration potentielle	56
Figure 29 : Différence entre l'ETP et l'ETR.....	57
Figure 30 : Débits entrant vers les nappes souterraines	58
Figure 31 : Débits sortant des sites de demande (Pop. Andapa 1, Andapa 2, Lokoho)	58
Figure 32 : Débits annuels en amont de la rivière Lokoho	59

Figure 33 : Evolution du stockage des eaux souterraine	60
Figure 34 : Demande en eau pour l'ensemble des sites de demande avec les scenarios	60
Figure 35 : Demande en eau pour la population Andapa 1	61
Figure 36 : Eau distribuée par le fleuve Lokoho en fonction du type de climat	62
Figure 37 : Eau distribuée pour tous les sites de demande, scenario « référence », toute source	62
Figure 38 : Demande non satisfaite des sites de demande, scenario : « Référence »	63
Figure 39 : Demande non satisfaite annuelle de la population Andapa 1	64
Figure 40 : Recouvrement des besoins en eau mensuel des sites de demande, scenario : « référence »	64
Figure 41 : Débits annuel des sites de demande, scenario « changement climatique »	65
Figure 42 : Recouvrement avec norme respectée.....	66
Figure 43 : Recouvrement avec norme non respectée	66
Figure 44 : Recouvrement mensuel des sites « agriculture » et « population Lokoho », scenario : « référence ».....	69
Figure 45 : Recouvrement mensuel des sites « agriculture » et « population Lokoho », scenario : « changement de la priorité de la demande ».....	69
Figure 46 : Fenêtre d'introduction des données du « niveau de recyclage » de l' « agriculture ».....	71
Figure 47 : Demande non satisfaite du site « agriculture », scenarios : « référence » et « recyclage de l'eau de l'agriculture »	72
Figure 48 : Fenêtre montrant le nouvel élément « désalinisation »	74
Figure 49 : Taux de satisfaction mensuel de la population « Andapa 1 » et « Lokoho » sans l'usine de désalinisation	75
Figure 50 : Taux de satisfaction mensuel de la population « Andapa 1 » et « Lokoho » avec l'usine de désalinisation	75
Figure 51 : Coût moyen unitaire mensuel de la désalinisation	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Régime pluviométrique observé à Andapa (1983-2013)	14
Tableau 2 : Précipitations caractéristiques de la zone climatique Est et Hauts reliefs	14
Tableau 3 : Températures mensuelles à la station Andapa aéroport (1983-2013).....	15
Tableau 4 : Variations des températures moyennes par station météorologique.....	16
Tableau 5 : Evapotranspiration potentielle de la zone d'Andapa (2013).....	17
Tableau 6 : Evaporation moyenne (mm) de la Région SAVA	17
Tableau 7 : Caractéristiques hydrodynamiques des nappes de la Région SAVA.....	20
Tableau 8 : Répartition spatiale de la population de la Région SAVA (2001).....	22
Tableau 9 : Population dans chaque Commune du District d'Andapa (2001)	23
Tableau 10 : Infrastructures sanitaires (1999)	23
Tableau 11 : Approvisionnement en eau de la Région SAVA (2002).....	24
Tableau 12 : Répartition des surfaces cultivables et cultivées par District (2001).....	24
Tableau 13 : Répartition de la superficie par spéculation (2001)	25
Tableau 14 : Evolution du nombre d'animaux par type d'élevage dans le bassin versant Lokoho (2005-2012)	26
Tableau 15 : Répartition des moyens matériels et humains (1990).....	26
Tableau 16 : Sites de demande avec les informations	36
Tableau 17 : Variation des débits moyens mensuels à Andapa (1965-1981).....	37
Tableau 18 : Informations concernant les eaux souterraines	37
Tableau 19 : Caractéristiques des nappes souterraines de la zone Nord de Madagascar.....	38
Tableau 20 : Recharge naturelle mensuelle des nappes souterraines	38
Tableau 21 : Caractéristiques du réservoir JIRAMA.....	39
Tableau 22 : Evaporation nette	39
Tableau 23 : Climat dans la culture de référence.....	40
Tableau 24 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux du bassin versant de la Lokoho .	41
Tableau 25 : Besoins en eau (m ³ /ha/an) de chaque type d'agriculture	45
Tableau 26 : Définition des types de climats	47
Tableau 27 : Niveau de recyclage annuel de l'eau de l' « agriculture ».....	71
Tableau 28 : Coût de la distillation	73
Tableau 29 : Coût de l'électrodialyse	73
Tableau 30 : Coût de l'osmose inverse	73

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE N°01 : NORMES DE POTABILITE DES EAUX RECOMMANDEES PAR L'OMS	89
ANNEXE N°02 : NORMALE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS (1961-1990)	90
ANNEXE N°03 : QUELQUES RESULTATS DE LA MODELISATION.....	91
ANNEXE N°04 : CARTE DE CHANGEMENT DES PRECIPITATIONS (1961-1990)	94

GLOSSAIRE

Changement climatique : définit par la Convention Cadre de Nations Unies comme « les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

Coefficient de culture : rapport entre l'évapotranspiration de la culture et l'évapotranspiration potentielle. Il permet de calculer les besoins en eau d'irrigation de la culture.

Eau douce : eau non salée, telle que l'eau des lacs, l'eau de pluie, des ruisseaux et des rivières, mais pas l'eau des océans.

Eau potable : eau convenant, du point de vue de la santé et du point de vue esthétique, à l'alimentation et à la préparation des aliments et à tous les usages domestiques dont l'hygiène personnelle.

Hydrologie : branche de la science de la terre qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol.

Linnigraphe : appareil qui permet d'enregistrer automatiquement les variations du niveau d'eau.

Linnimètre : équipement permettant l'enregistrement et la transmission de la mesure de la hauteur d'eau (en un point d'eau) dans un cours d'eau.

Modélisation : création d'une représentation (modèle) pour décrire un phénomène dans le but de prévoir son évolution en fonction de sollicitations connues.

Pluviographe : instrument permettant l'enregistrement automatique, permanent et continu de la hauteur instantanée de précipitations.

Pluviomètre : instrument destiné à mesurer la quantité de précipitations (surtout la pluie) tombée pendant un intervalle de temps donné en un endroit.

Qualité de l'eau : aptitude de l'eau, déterminée par ses caractéristiques physiques, chimiques, biotiques ou organoleptiques, à servir à un usage défini ou à permettre le fonctionnement d'un milieu aquatique donné.

Scenario : prévision réalisée selon certaines hypothèses, et tenant compte des contraintes d'une situation économique, démographique etc.

Vulnérabilité des ressources en eau : ensemble des différentes sensibilités de ces ressources vis-à-vis d'un certain nombre de facteur.

WEAP : outil de planification intégrée des ressources en eau pour microordinateur.

INTRODUCTION

L'eau, l'« or bleu », constitue l'élément le plus indispensable dans la vie. Et pourtant, bien qu'elle couvre environ 70% de la planète (soit environ $1,4.10^9$ km³), les ressources en eau sont inégalement réparties dans l'espace et dans le temps. Les impacts de la variabilité et/ou du changement climatique s'ajoutent à cela et aggravent la situation. De plus, la plupart de ces ressources sont mal gérées et sont ainsi privées de préservation. L'eau devient ainsi de plus en plus rare et dès lors, de plus en plus convoitée. De ce fait, elle constitue un enjeu politique, voire géopolitique des plus pesants. Dans ce cadre, sa gestion est vitale dans les années à venir, sans quoi, le manque d'eau demeurera l'une des préoccupations majeures des acteurs de développement.

Madagascar est parmi les plus riches en eau avec plus de $3,32.10^{11}$ m³/an de ressources en eau de surface (AQUASTAT, 2005). Toutefois, les unes sont surexploitées et d'autres sont sous exploitées, créant ainsi un clivage entre les localités et entraînant plusieurs facteurs de sous-développement. De plus, l'industrie minière commence à prendre place dans l'économie Malgache, or elle fait partie des plus grands consommateurs et pollueurs d'eau. La pénurie d'eau donc est un risque imminent vers lequel on avance pas à pas si aucune mesure radicale n'est envisagée. La Région SAVA n'échappe pas à cette réalité. Dans le bassin versant de la Lokoho, l'objet de notre étude, une exploitation efficace et productive est indispensable dans le cadre de la préservation des ressources en eau. A cet effet, quelles méthodes et techniques devraient être utilisées pour prévoir l'évolution de ces ressources, aussi bien en quantité qu'en qualité, et de prévenir le manque d'eau dans les années à venir ?

Tel sera alors l'objet du présent mémoire intitulé « **Modélisation hydrologique par WEAP21 pour une gestion intégrée des ressources en eau : cas du bassin versant de Lokoho (Nord-est de Madagascar)** ». Le but final étant de mettre en exergue les différents aspects des ressources disponibles en eau afin de pouvoir ressortir des mesures techniques pour une gestion efficace et productive.

Pour ce faire, cet ouvrage est articulé en cinq chapitres. Le premier chapitre concerne le concept de base et études analytiques des ressources en eau. Le deuxième chapitre présente la zone d'étude. Le troisième et le quatrième chapitre reposent successivement sur la modélisation hydrologique de la zone d'étude et les résultats avec leurs interprétations. Le cinquième et dernier chapitre est consacré aux orientations stratégiques en matière de gestion des ressources en eau.

**PREMIER CHAPITRE : CONCEPT DE
BASE ET ETUDES
ANALYTIQUES DES
RESSOURCES EN EAU**

La gestion de l'eau désigne l'activité qui consiste à planifier, développer et distribuer l'utilisation optimale des ressources en eau dans le but de leur préservation efficace et productive. La tâche s'avère ardue dans la mesure où il faudrait utiliser une ressource limitée et inégalement répartie, de manière intelligente. Aussi, faudrait-il bien situer les différents aspects dans le cadre de la gestion des ressources en eau.

Dans ce chapitre, nous allons voir les différents types de ressources en eau, le système de gestion ou bassin versant et la gestion intégrée de ces ressources.

I-1 LES DIFFERENTS TYPES DE RESSOURCES EN EAU [19]

La ressource en eau comprend toutes les eaux accessibles, utiles et disponibles pour l'homme et les écosystèmes, à différents points du cycle de l'eau (Gaudremeau, 2004).

Sur la Terre, 97% de la ressource est de l'eau salée tandis que 2% est bloquée sous forme de glace. Il ne reste alors que 1% sous forme d'eau douce exploitable pour l'homme (GreenFact, 2006), ayant une origine continentale :

- l'eau de pluies (précipitations) ;
- l'eau de surface (dans les fleuves et rivières, les lacs et des marais, les étangs et autres petites dépressions fermées) ;
- les eaux souterraines (dans les différents magasins aquifères).

I-1-1 Précipitations ou ressources en eau de précipitation [1] [19]

Les précipitations regroupent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide que solide. Elles constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Par des précipitations efficaces, suivant les facteurs régissant l'index hydrogéologique (géologie de surface, géomorphologie, état de la surface du sol, etc.), l'eau de pluie développe les réservoirs d'eau de surface par le ruissellement, assure l'humidité du sol et la recharge des nappes souterraines par l'infiltration efficace.

La hauteur des pluies tombées peut être mesurée ou estimée à l'aide d'un pluviomètre ou d'un pluviographe au niveau d'une station d'observation. Les précipitations exprimées en hauteur de pluie, en millimètre représentent la quantité d'eau de pluie précipitée par unité de surface dans un espace donné, dont 1 mm de hauteur de pluie correspond à 1 litre de pluie tombée sur un mètre carré de surface horizontale ($1\text{mm} = 1\text{ L/m}^2$).

Dans tout Madagascar, la ressource en eaux pluviales est évaluée en moyenne à plus de $9,05.10^{11} \text{ m}^3/\text{an}$ (Andrianirina et al, 2014). Toutefois, le régime pluviométrique est irrégulier avec une répartition inégale. De ce fait, on distingue quatre grands régimes pluviométriques plus ou moins homogènes : l'Est et les Hauts reliefs, les Hautes Terres, le Nord-ouest et le Sud.

I-1-2 Ressources en eaux de surface [8]

Les ressources en eau de surface sont constituées par l'ensemble des réservoirs des masses d'eau superficielle courante ou stagnante, douce, saumâtre et salée qui sont en contact direct avec l'atmosphère ou à plan d'eau libre. Elles incluent donc les ruisseaux, les rivières et fleuves, les lacs et marais, les mers et océans. Elles proviennent des précipitations efficaces sur le bassin versant récepteur et/ou de vidange des nappes souterraines au niveau des sources et suintements.

Dans tout Madagascar, les ressources en eau de surface sont évaluées à $3,32.10^{11} \text{ m}^3/\text{an}$ (AQUASTAT, 2005).

I-1-2-1 Ruisseaux, rivières et fleuves [4] [8]

Ce sont des écoulements continus d'eau en surface (cours d'eau) qui se différencient par leurs tailles et leurs structures (affluent, confluent) (CILF, 1992). Les écoulements peuvent être pérennes, temporaires ou caractère saisonnière.

La connaissance des débits d'étiage de cours d'eau est très importante pour toute adduction d'eau (l'irrigation, AEPG, etc.). Cependant, la construction des barrages nécessite des données sur les crues (débit et hauteur d'eau). On peut ainsi procéder aux jaugeages pour déterminer les débits et à l'installation de limnimètre et/ou de limnigraphe pour suivre la hauteur d'eau de ces réseaux de surface.

Madagascar dispose plus de 3 000 km de fleuves et rivières réparties dans 5 grands bassins fluviaux tels que : le Versant Nord-est et Montagne d'Ambre, le Versant de Tsaratanana, le Versant Est, le Versant Ouest et le Versant Sud (Chaperon et al, 1993).

I-1-2-2 Lac et marais [4] [22]

Ils résultent de l'accumulation d'eau derrière un mur imperméable (Razafitsiatosika, 2008), mis en place naturellement ou artificiellement au cours des écoulements souterrains des bas-fonds alluviaux. Cette accumulation d'eau provient surtout :

- des ruissellements de surface abondants en saison de pluies, s'écoulant dans les pentes des collines latéritiques dans le cas des Hautes Terres malgaches pour aboutir dans les dépressions inter collinaires formées par les bas-fonds, rencontrés dans les bas-fonds même (Razafitsiatosika, 2008) ;
- des sources et suintements à l'exutoire des nappes aquifères ;
- des affleurements des nappes.

A Madagascar, plus de 3 000 lacs couvrent 2 000 km², la plupart des marais sont transformés en rizières (Chaperon et al, 1993). Compte tenu de leur nombre, les lacs de Madagascar représentent une ressource importante pour l'irrigation, l'hydroélectricité et l'alimentation en eau des villes ainsi que la biodiversité aquatique.

I-1-3 Les ressources en eaux souterraines [3]

Les eaux souterraines sont constituées par tous les réservoirs d'eaux contenues dans le sol et le sous-sol, dont les eaux adsorbées et pelliculaires non mobilisables ainsi que les eaux gravifiques ou gravitaires exploitables. Nous ne considérons ici que les eaux mobilisables ou eaux gravitaires qui circulent dans la zone saturée du sous-sol constituant les nappes souterraines.

Quant à la ressource en eau souterraine, elle constitue la quantité d'eau pouvant être extraite dans le sol ou sous-sol pendant une période donnée (Castany, 1982).

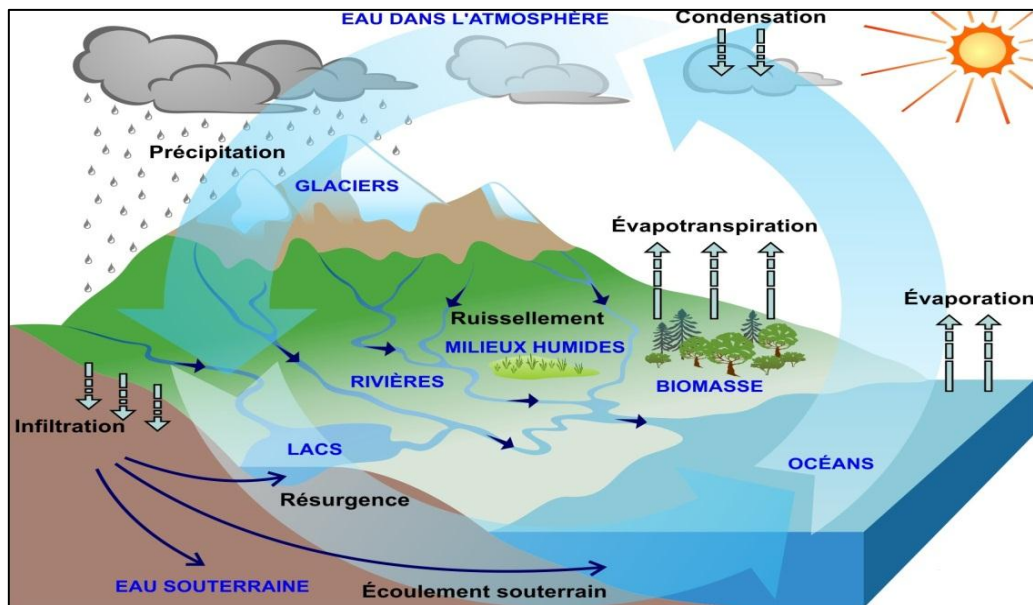
Pour évaluer leur potentialité, on procède souvent à des tests de productivité des puits et des forages avec des essais par pompage ou essais de débit. Ces essais peuvent être réalisés, soit par essai de puits ou pompage à courte durée, soit par pompage d'essai ou un pompage à longue durée opéré dans le puits ou forages, en vue de déterminer les caractéristiques et en particulier son débit, l'évolution du débit de l'ouvrage et du rabattement du niveau statique de la nappe (Castany, 1998).

L'origine des eaux souterraines peut être expliquée avec le cycle de l'Eau.

I-1-3-1 Cycle de l'eau [28]

Le début du cycle se fait toujours par la transformation de l'eau en vapeur au niveau des plans d'eau libre (fleuve, rivière, lac, marais, océan et mer), au niveau du sol (évaporation), et au niveau des êtres vivants, en particulier les végétaux (transpiration) donc par évapotranspiration. La vapeur monte donc dans l'atmosphère, se condense en nuage qui, sous certaines conditions de température et de pression se précipite et donne les précipitations, ces

dernières tombent à leur tour sur le globe terrestre et restent. Si elles sont efficaces ou effectives, une partie se ruisselle et alimente les réseaux de surface, une autre partie s'infiltré pour assurer l'humidification du sol et/ou la recharge de la nappe souterraine qui, à leur tour s'émerge au niveau des sources et le cycle recommence (figure 1).



Source : <http://www.intellego.fr/>

Figure 1 : Origine des eaux souterraines selon le cycle de l'eau

I-1-3-2 Origine des eaux souterraines

Le cycle hydrologique montre que les eaux souterraines proviennent essentiellement des eaux météoriques, c'est-à-dire des précipitations (pluie, neige, etc.) et de leur infiltration efficace dans le sous-sol ou des eaux cannelées que l'on trouve en profondeur dans la croûte terrestre à partir de 1 à 2 km. Ces dernières sont dérivées de celles des réservoirs météoriques qui ont réagi avec les roches encaissantes et/ou traversées.

Les eaux souterraines peuvent être aussi libérées directement par des processus magmatiques en profondeur ou eaux juvéniles.

I-2 GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE) [6]

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) ou en Anglais « *Integrated Water Resources Management* » (IWRM) a été promue par le Partenariat Mondial de l'Eau (GWP) en 2000. C'est un processus favorisant le développement et la gestion coordonnés des ressources en eau, du sol et des ressources associées, permettant de maximiser les bénéfices

économiques et sociaux, de façon équitable sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux (GWP, 2000). Ce programme est axé sur la gestion des bassins versants.

I-2-1 Notion d'intégration

En référence à des composantes environnementales, sociales, économiques et spatiales, l'élément le plus pertinent de la GIRE est la notion d'intégration et notamment ceux :

- de toutes les ressources : l'eau sous toutes ses formes, les milieux aquatiques et les services écosystémiques rendus ;
- des savoirs et des expertises ;
- des besoins, des fonctions et l'harmonisation des usages, donc l'intégration sociale ;
- des acteurs : gouvernement, collectivités territoriales, organismes (nationaux et internationaux), population locale, techniciens et chercheur etc ;
- des aspects économiques ;
- des espaces ou spatiale : le bassin versant.

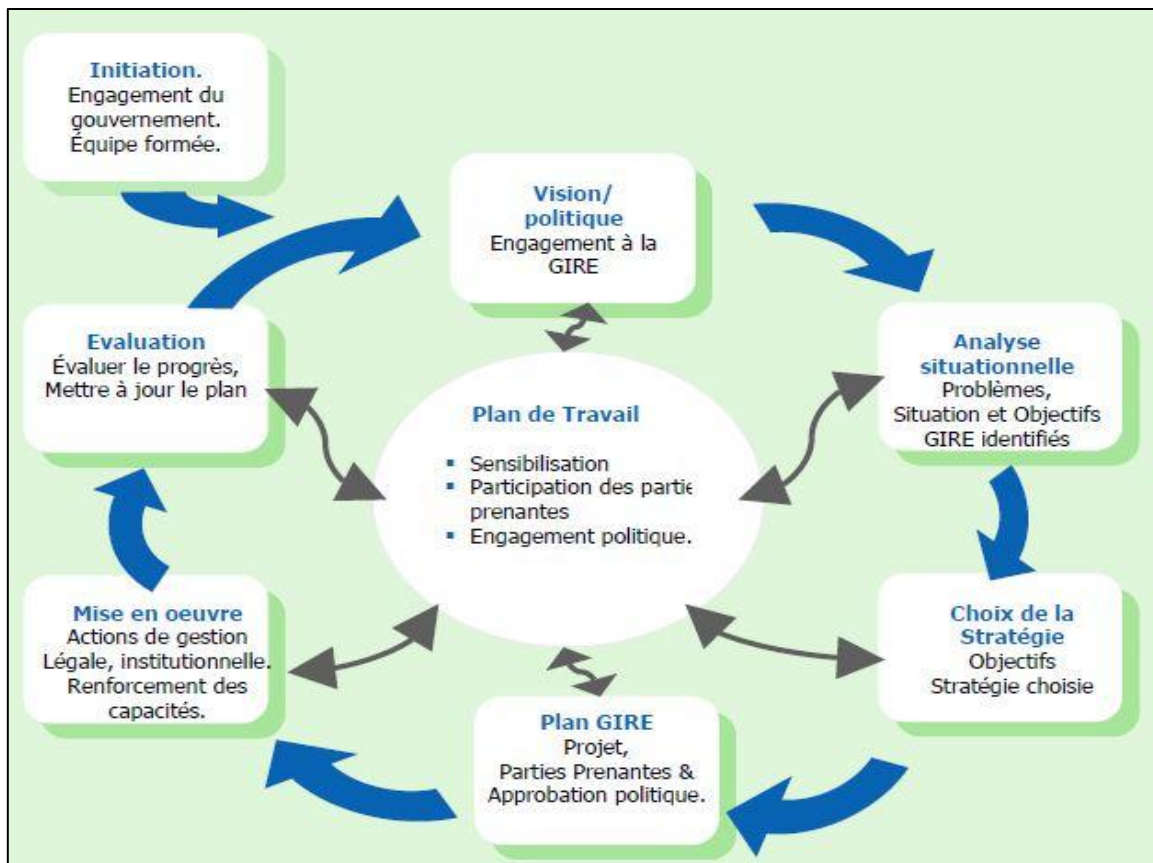
I-2-2 Cycle de planification [6]

Le cycle de planification est une suite logique de phases et qui est conduit et soutenu par un appui continu de gestion et des événements de consultation. La planification atteint son efficacité maximale lorsqu'elle est perçue comme un cycle continu.

I-2-2-1 Initiation

La planification du plan de la GIRE nécessite une équipe pour organiser et coordonner les efforts et pour faciliter une consultation régulière des parties prenantes. Un point de départ important pour un engagement du gouvernement consiste alors à la compréhension des principes de la GIRE et de la gestion des ressources en eau pour le développement durable.

Le cycle de planification de la GIRE est présenté dans la figure 2 ci-après.



Source : GWP (2005)

Figure 2 : Cycle de planification du plan GIRE

I-2-2-2 Planification de travail et participation des parties prenantes

Elle implique la volonté politique et le leadership des responsables ainsi que les autres parties prenantes. L'engagement de ces dernières est nécessaire dans la mesure où elles ont force à influencer la société dans la gestion de l'eau, à travers des efforts communs et/ou des changements de comportement. Ainsi, la planification demande l'identification et la mobilisation des principales parties prenantes, en dépit de leurs objectifs multiples et souvent contradictoires.

Les politiciens constituent un groupe spécial parmi ces parties prenantes étant donné qu'ils sont non seulement responsables de l'approbation des projets de société mais aussi les succès ou les échecs y afférent lui sont imputables. A cet effet, la gestion du processus, le maintien de l'engagement politique, l'assurance d'une participation effective des parties prenantes et la sensibilisation sur les principes de la GIRE sont au cœur même de tout le processus de planification.

I-2-2-3 Création d'une vision stratégique

Une vision nationale de l'eau représente les aspirations et les objectifs partagés, dans le cadre de l'utilisation et de la gestion des ressources en eau dans un pays. Dans ce sens, une vision fournit les principes de gouvernement et d'orientation des ressources en eau. C'est alors le guide principal du processus de planification. Cette vision se traduira en politique dont la finalité est pour une utilisation durable des ressources.

I-2-2-4 Analyse situationnelle

Afin de définir les actions requises pour réaliser une telle vision, il est important de cerner la situation existante. A cet effet, la consultation des parties prenantes dont les différentes entités du gouvernement est cruciale afin de comprendre les besoins et les objectifs compétitifs en rapport avec la disponibilité des ressources en eau. Dans ce cadre, les problèmes et les contraintes devraient ressortir, des indications des types de solutions nécessaires et/ou possibles pourront alors être apposées suivant la vision établie combinée aux principes de la GIRE.

Cette phase permet d'identifier les forces et les faiblesses dans la gestion des ressources en eau. Ceci permettra ensuite de ressortir les différents aspects à prendre en compte afin d'améliorer la situation tout en se conformant à la vision déjà établie. Au final, les objectifs peuvent être alignés aux problèmes et les questions identifiés ainsi qu'aux priorités nationales.

I-2-2-5 Stratégies de gestion de l'eau

Les différentes solutions adaptées ressortent des problèmes et contraintes définis. Ces solutions doivent être analysées suivant les conditions, les avantages et les inconvénients identifiés ainsi que leur faisabilité.

La définition des objectifs du Plan GIRE est important à ce stade notamment dans la formulation de stratégies appropriées dans le cadre d'une gestion durable. L'action technique et la gestion effective viennent après, tout en tenant compte la complexité du secteur de l'eau. Ici, il est essentiel d'identifier les zones d'action prioritaires.

I-2-2-6 Plan GIRE préparé et approuvé

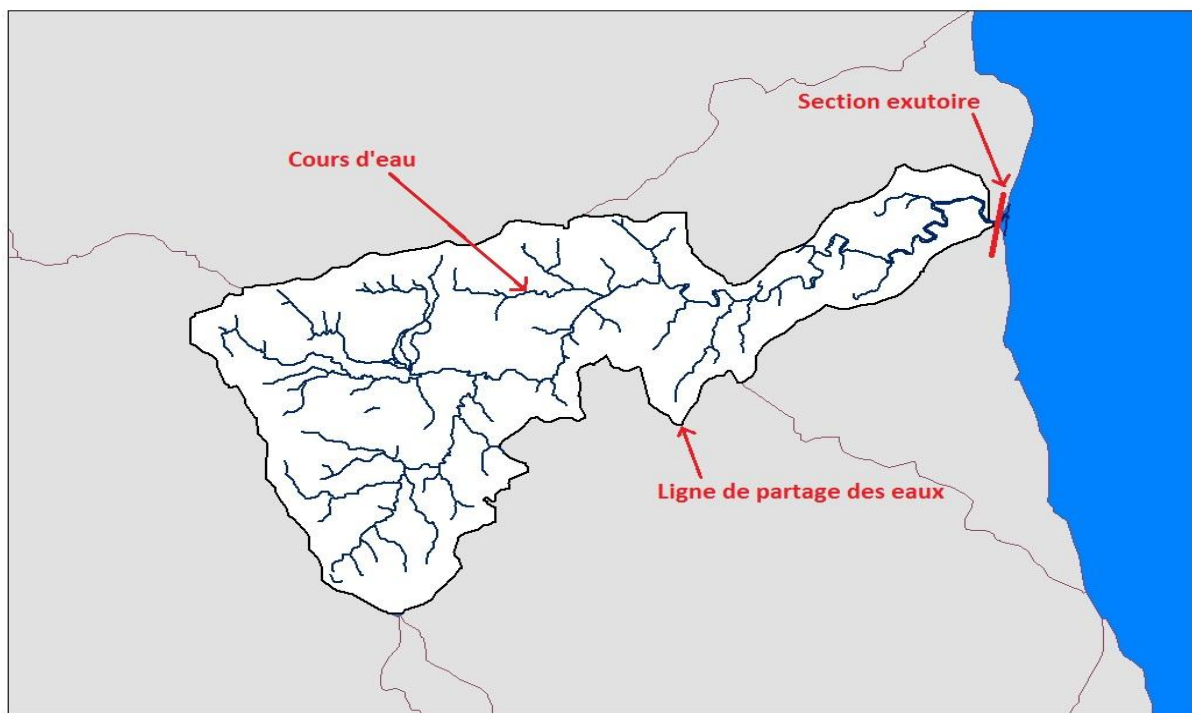
Sur la base de la vision, l'analyse situationnelle, et l'utilisation d'une stratégie des ressources en eau, on peut préparer un Plan GIRE. Plusieurs ébauches peuvent être requises, pour réaliser non seulement des activités faisable et réaliste, mais aussi pour amener les politiciens et les parties prenantes à se mettre d'accord sur les divers compromis et décision.

L'approbation par le gouvernement est essentielle à la mobilisation et à la mise en œuvre du plan GIRE.

Bref, la réalisation de la gestion et la mise en valeur durables des ressources en eau sont des engagements à long terme et le plan devrait être vu comme un plan tournant avec des dispositifs d'évaluation et de reformulation à intervalle périodique.

I-3 BASSIN VERSANT

Un bassin versant est une portion de territoire délimitée par une ligne de crête (ou lignes de partage des eaux) fermée avec un niveau de base local appelé exutoire et irriguée ou drainée par un même réseau hydrographique (fleuve et/ou rivière avec ses affluents, lac et marais). C'est l'unité de référence en hydrologie et le système naturel de gestion en technologie de GIRE.



Source : BD 500 FTM

Figure 3 : Un bassin versant

En général, le bassin versant porte le nom du cours d'eau. Il constitue la base des différents systèmes hydrologiques.

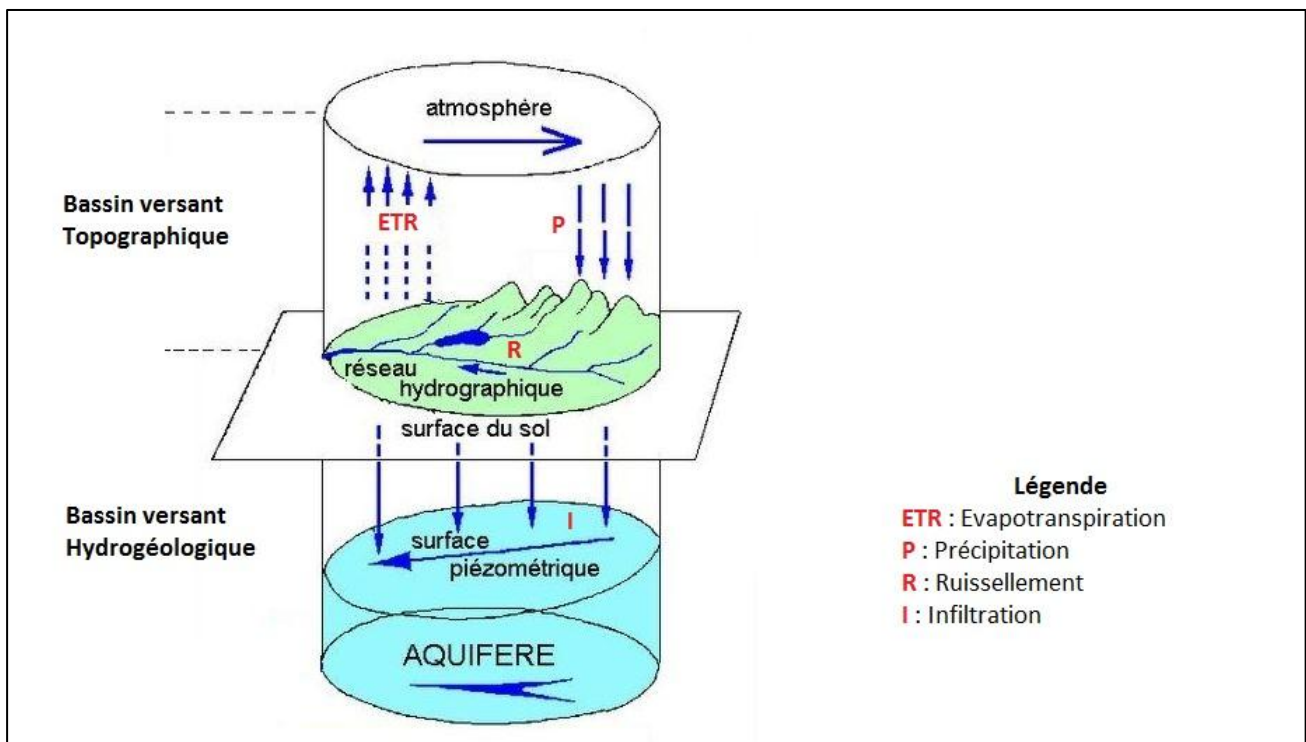
Le bassin versant hydrologique est formé par le bassin versant topographique ou hydrographique et le bassin versant hydrogéologique avec ses systèmes aquifères.

I-3-1 Bassin versant topographique ou hydrographique

Le bassin versant topographique est la partie située au-dessus de la surface du sol d'un bassin versant hydrologique. C'est le domaine des eaux de surface. Dans ce bassin versant, l'écoulement superficiel prédomine.

I-3-2 Bassin versant hydrogéologique [32]

Il correspond à la partie souterraine du bassin versant hydrologique. Il est formé par le système aquifère et leur nappe. Il délimite la zone d'alimentation du cours d'eau à partir de la connaissance topographique et de la connaissance des formations géologiques du site.



Source : <https://www.u-picardie.fr/>

Figure 4 : Distinction entre bassin versant topographique et hydrogéologique

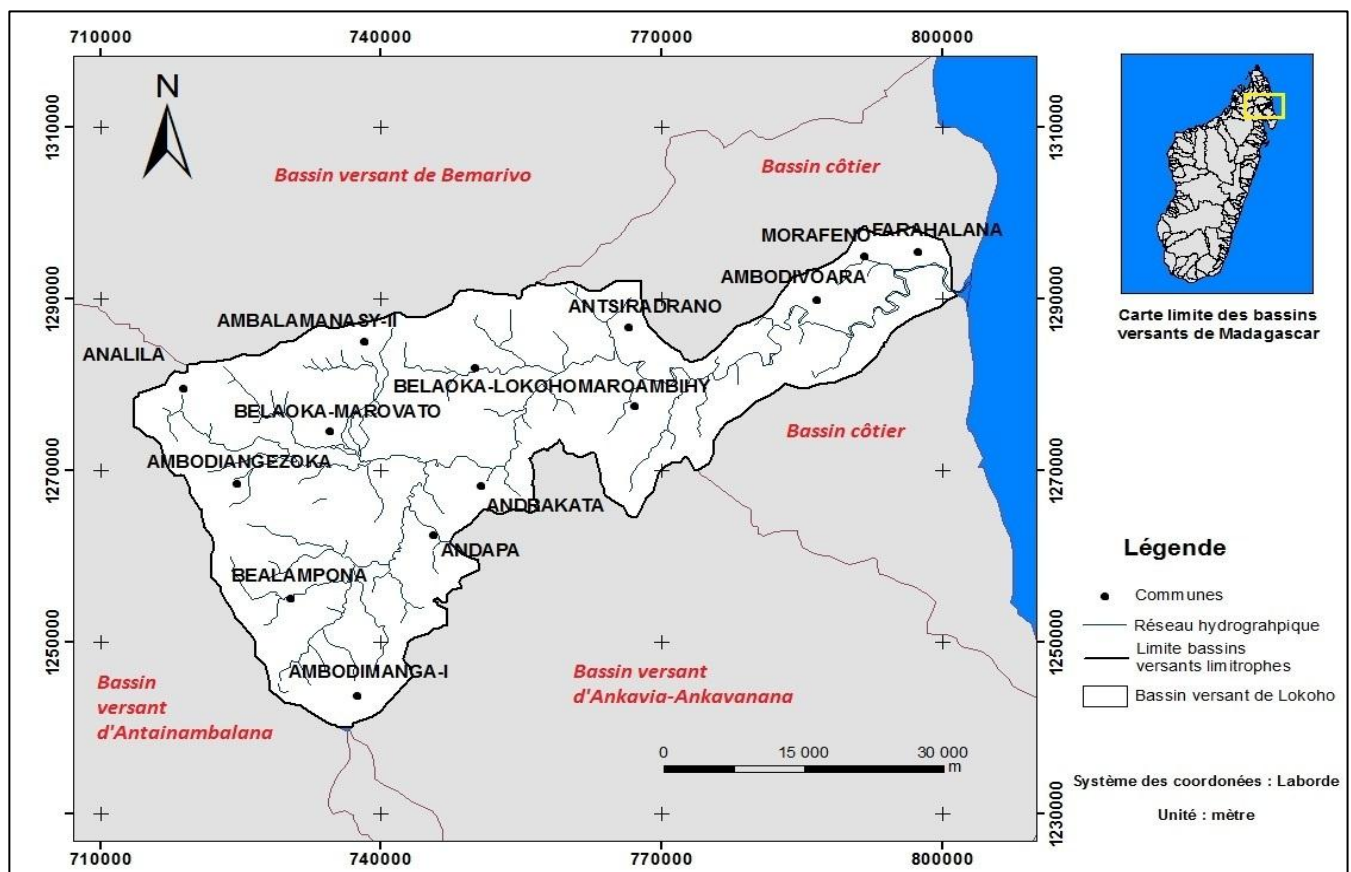
La connaissance générale des ressources en eau est essentielle dans la gestion intégrée des ressources en eau. Maintenant, nous allons passer à la présentation de la zone d'étude afin de mieux connaître le bassin versant aux fins des interprétations ultérieures.

DEUXIEME CHAPITRE :
PRESENTATION DE LA ZONE
D'ETUDE

La présentation de la zone où se trouve le bassin versant à étudier est impérative dans toute modélisation hydrologique. Dans ce chapitre, nous présenterons la zone d'étude en détaillant les contextes géographique, climatique, géologique, hydrologique, hydrogéologique et socio-économique.

II-1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le bassin versant est drainé par la rivière Lokoho, d'où son nom : bassin versant de la Lokoho. Il est situé dans la Région SAVA, District d'Andapa. Il a 286 km de périmètre et s'étend sur une superficie de 2 015 km². Il est délimité au Nord par le bassin versant de la Bemarivo, au Sud par le bassin versant de l'Ankavia-Ankavanana, à l'Ouest par le bassin versant de l'Antainambalana, et à l'Est par quelques petits bassins côtiers.



Source : BD 500 FTM

Figure 5 : Localisation du bassin versant de la Lokoho

II-2 CONTEXTE CLIMATIQUE [9]

Le bassin versant de la Lokoho appartient à la zone climatique Est et Hauts reliefs. Le climat de la Région est de type tropical chaud et humide, caractérisé par deux saisons distinctes :

- **la saison chaude** qui va d'Octobre en Avril, est caractérisée par des températures élevées ($21^{\circ}\text{C} < T < 23,5^{\circ}\text{C}$). La pluviosité maximale et la température la plus élevée s'observent généralement aux mois de Janvier et Février ($P = 333 \text{ mm}$, $T = 23,5^{\circ}\text{C}$).
- **la saison fraîche** qui va de Mai en Septembre ; la fraîcheur de cette saison est due d'une part, par le vent d'*Alizé* apportant des masses d'air humide et d'autre part, la persistance des pluies fines (crachins) ($19,3^{\circ}\text{C} < T < 21,9^{\circ}\text{C}$).

II-2-1 Précipitations [1] [2]

L'abondance des précipitations annuelles et l'absence d'une véritable saison sèche constituent les principales caractéristiques de la Région SAVA. Le régime pluviométrique observé à Andapa est présenté dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Régime pluviométrique observé à Andapa (1983-2013)

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct
P (mm)	88,2	237,5	333	293,4	239,9	122,5	65,6	88	77,7	88	51,8	43,5

Source : Cabinet ECR (2013)

Etant donné que 1 mm de hauteur de pluie correspond à 1 litre de pluie tombée sur un mètre carré de surface horizontale, la quantité des eaux des précipitations dans cette zone est présentée dans le tableau 2 ci-après.

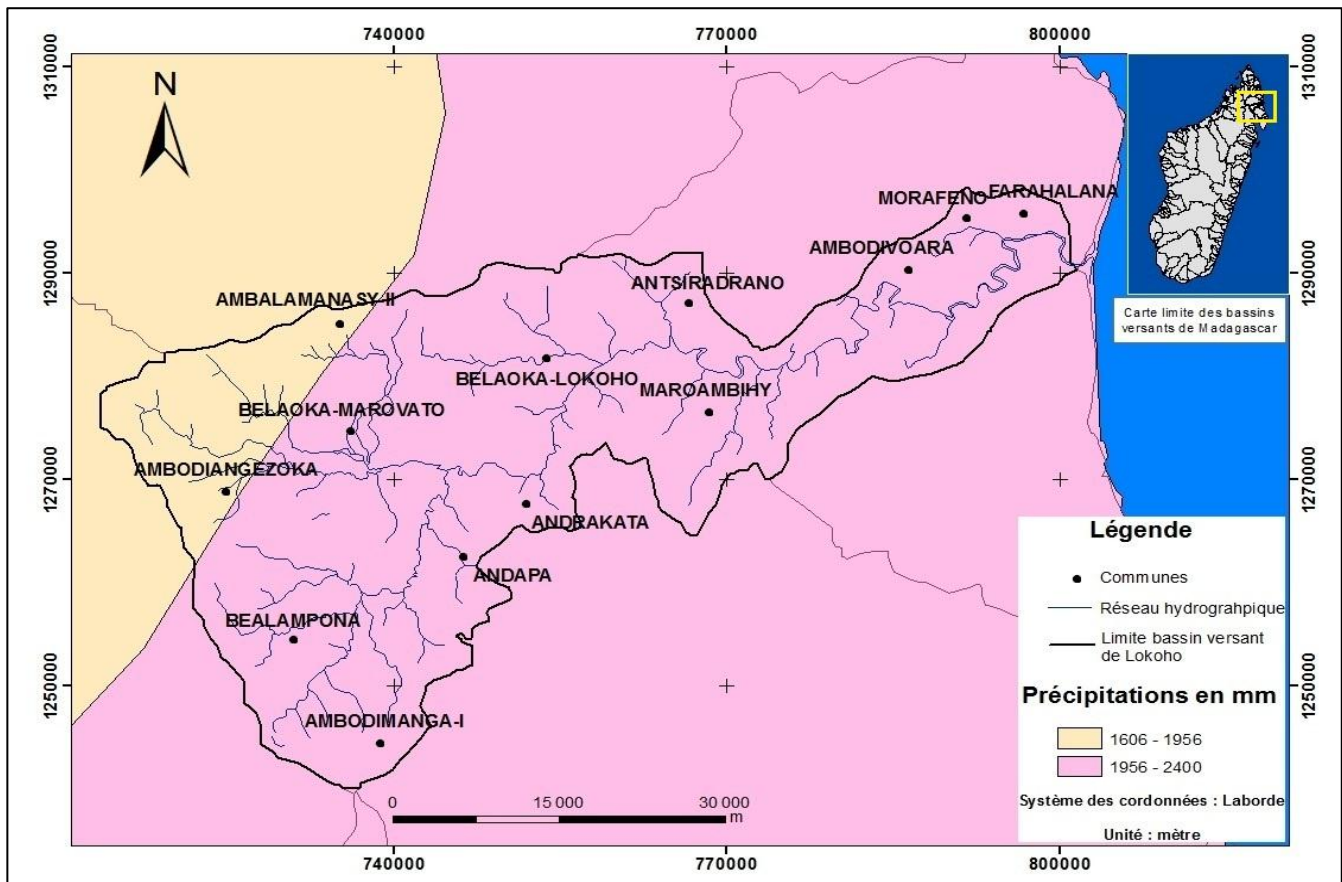
Tableau 2 : Précipitations caractéristiques de la zone climatique Est et Hauts reliefs

Période	Zones climatiques Est et Hauts reliefs
Référence N30	1 831 à 3 262 L/m ²
Période humide	108 à 478 L/m ²
Période sèche	66 à 318 L/m ²

Source : Andrianirina et al (2004)

Ce tableau montre que le bassin reçoit en moyenne 1 858 L/m² d'eau de précipitation par année hydrologique (référence N30 : précipitation normale de 30 ans de 1961 à 1990), soit $3,75 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ dans l'ensemble du bassin. La zone compte en moyenne 236 jours de pluie et 6 jours sur 10 dans le bassin versant Lokoho avec plus de 200 L/m²/mois de Décembre à Avril. La saison sèche est de ce fait presque imperceptible. On enregistre au mois d'Août, un maximum mensuel de 24 L/m² en moyenne (Andrianirina et al, 2014).

La figure 6 ci-dessous présente la carte des isohyètes de la Région.



Source : BD 500 FTM

Figure 6 : Carte isohyète du bassin versant de Lokoho

II-2-2 Température [2] [9]

Les températures font preuve d'une étonnante homogénéité le long de la côte. Les plus fortes chaleurs sont enregistrées aux mois de Janvier et Février, les plus frais aux mois de Juillet et Août (tableau 3).

Les températures moyennes à la station Andapa aéroport sont présentées dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 : Températures mensuelles à la station Andapa aéroport (1983-2013)

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct
T (°C)	22,2	23	23,5	23,4	23,3	22,7	21,9	20	19,3	19,3	20,1	21

Source : Cabinet ECR (2013)

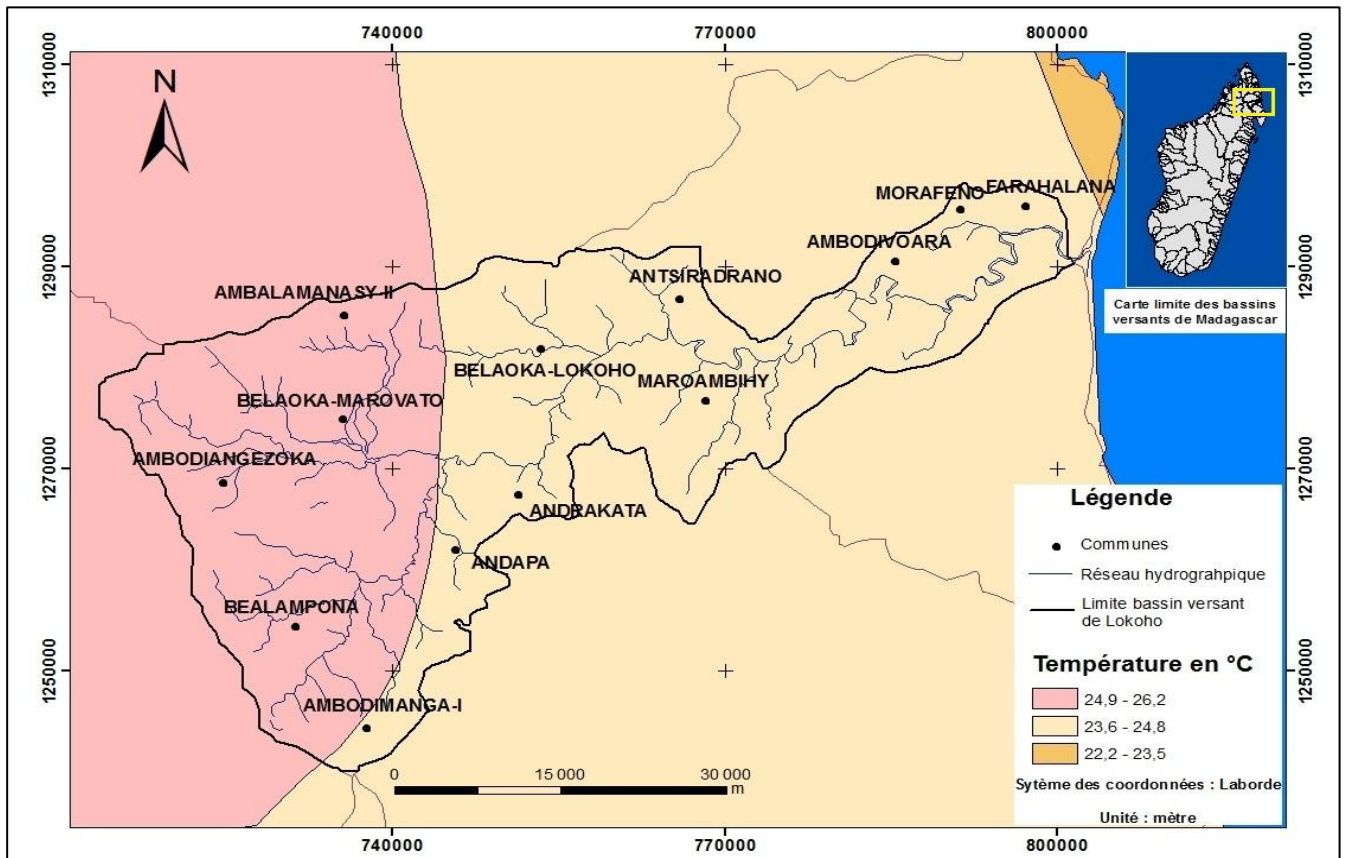
Andapa se trouvant sur une certaine hauteur, a une température variant de 18,3°C à 25,2°C (tableau 4). Malgré l'homogénéité des températures, on constate une grande différence entre les deux saisons chaude et fraîche.

Tableau 4 : Variations des températures moyennes par station météorologique

Station	Altitude (m)	Période	Température (°C)		
			Annuelle	Maximale	Minimale
Sambava (Aéroport)	5	1961-1990	24,7	26,9	22,9
		2000-2002	25	31,3	18,5
Antalaha (Ambatoratsy)	6	1961-1990	24,4	26,6	21,9
		2000-2002	24,7	28,9	18,6
Vohémar	5	1961-1990	25,5	27	22,9
		2000-2002	25,2	31,2	21,8
Andapa (Aéroport)	474	1961-1990	22,5	25,2	18,3

Source : Direction des Exploitations météorologiques (2003)

La figure 7 ci-dessous présente la carte des isothermes de la Région.



Source : BD 500 FTM

Figure 7 : Carte isotherme du bassin versant de Lokoho et ses environs

Voici le diagramme ombrothermique de la zone d'étude (1983-2013) :

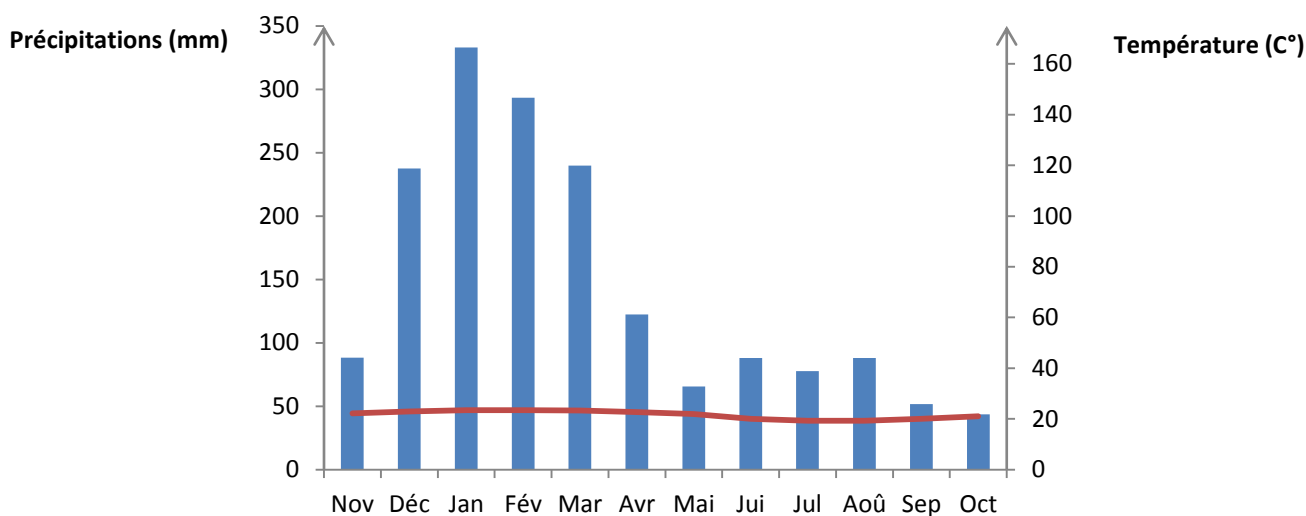


Figure 8 : Diagramme ombrothermique du District d'Andapa

II-2-3 Evapotranspiration [1] [2]

Les valeurs maximales s'observent pendant la saison chaude, d'Octobre en Mai. Durant cette saison, la variation de ce paramètre est assez conséquente (tableau 5).

Tableau 5 : Evapotranspiration potentielle de la zone d'Andapa (2013)

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct
ETP (mm)	101	123	101	123	128	110	119	97	79	58	62	80

Source : Cabinet ECR (2013)

L'évaporation de quelques stations de la Région est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 6 : Evaporation moyenne (mm) de la Région SAVA

Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct	Année
SAMBAVA Aérodrome (50°10'00" Est, 14°17'00" Sud à 5 mNGM)												
123	146	159	139	149	126	107	83	76	79	83	104	1 374
ANTALAHA à Ambadoratsy (50°20'00" Est, 15°00'00" Sud à 6 mNGM)												
114	136	145	129	136	115	100	79	72	75	79	97	1 277
VOHEMAR (50°00'00" Est, 13°22'00" Sud à 5 mNGM)												
133	146	164	143	153	131	116	93	83	85	91	112	1 450
ANDAPA Aéroport (49°37'00" Est, 14°39'00" Sud à 474 mNGM)												
101	123	128	110	119	97	79	60	55	58	62	80	1 072

Source : Andrianirina et al (2014)

De Juin en Septembre, l'évaporation affiche des valeurs légèrement inférieures à 80 mm. On note toutefois une croissance à partir du mois d'Octobre pour atteindre son maximum vers les mois de Décembre à Janvier (tableau 6).

II-2-4 Vents et cyclones [9]

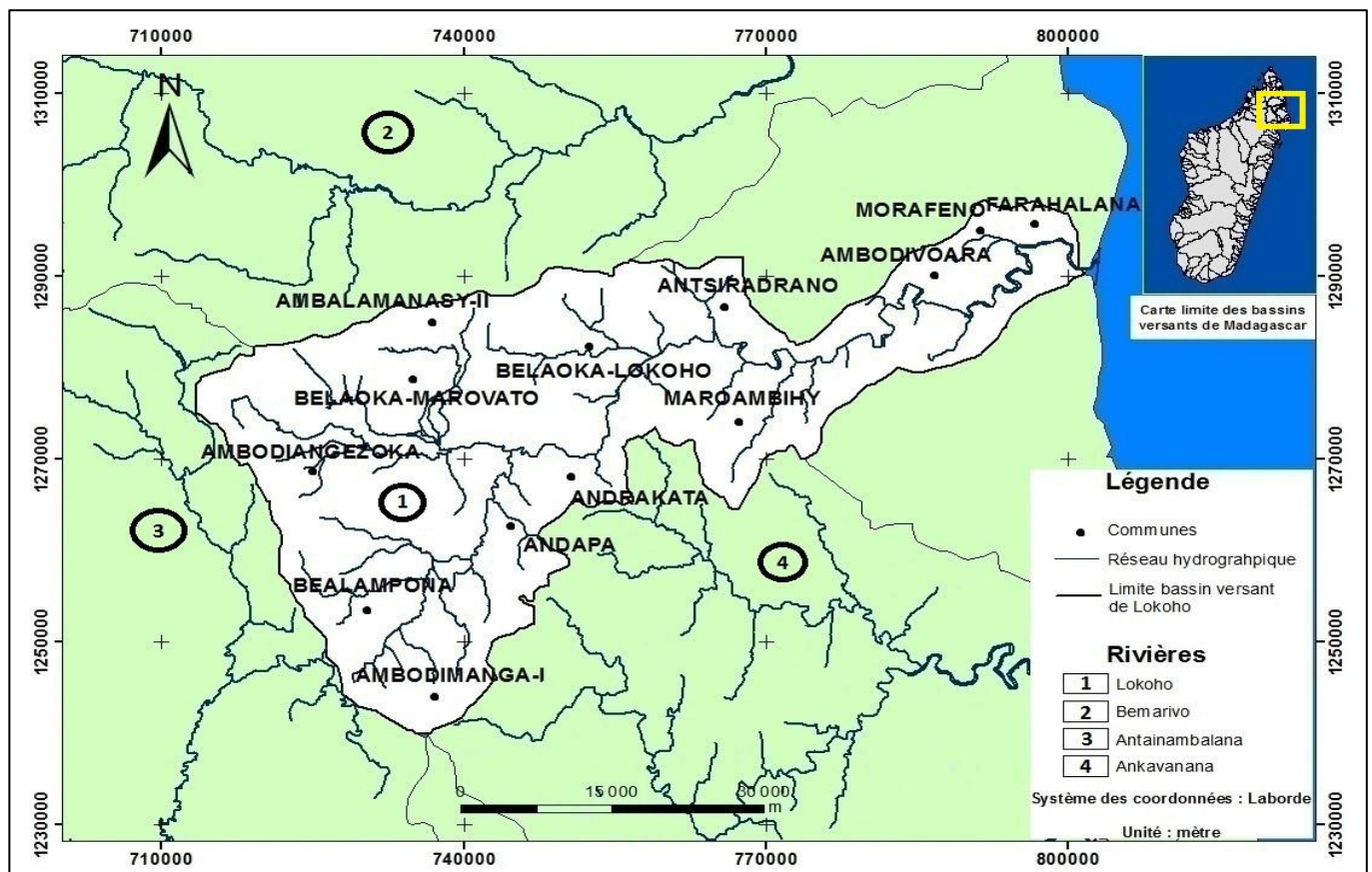
Le « *Varatraza* », le vent d'Est, prédomine partout en toutes saisons. Les vents d'Ouest « *Talio* » apparaissent beaucoup moins fréquemment. Les cyclones, quant à eux, sont des phénomènes climatiques plus spectaculaires, tant par la quantité des précipitations que par la vitesse des vents.

De 1985 à 2000, six cyclones tropicaux ont traversé la Région de SAVA dont le plus intense est le cyclone tropical HUDAH qui a détruit le District d'Antalaha à 90%.

II-3 HYDROGRAPHIE-HYDROGEOLOGIE

II-3-1 Hydrographie [9] [17]

La figure 9 ci-après montre la carte hydrographique de la zone.



Source : BD 500 FTM

Figure 9 : Carte hydrographique du bassin versant de la Lokoho

Les principales rivières dans la région de SAVA sont la Bemarivo, la Lokoho, l'Ankavia, l'Ankavanana et l'Antainambalana.

Lokoho, appelé aussi souvent Lokoro, est une rivière qui prend sa source dans les Communes Ambodiangezoka-Ambodimanga-Bealampona.

Abondamment alimentées pendant la majeure partie de l'année, la rivière Lokoho possède un débit d'étiage peu prononcé en Octobre - Novembre. Les effets des crues sont amplifiés dans la zone littorale par le colmatage continu des embouchures. Dans l'ensemble, elle n'est navigable que dans la partie traversant la plaine littorale d'une longueur de 15 km environ. A partir des fortes pentes, elle est inaccessible et les crues y sont particulièrement brutales et présentent des débits très élevés.

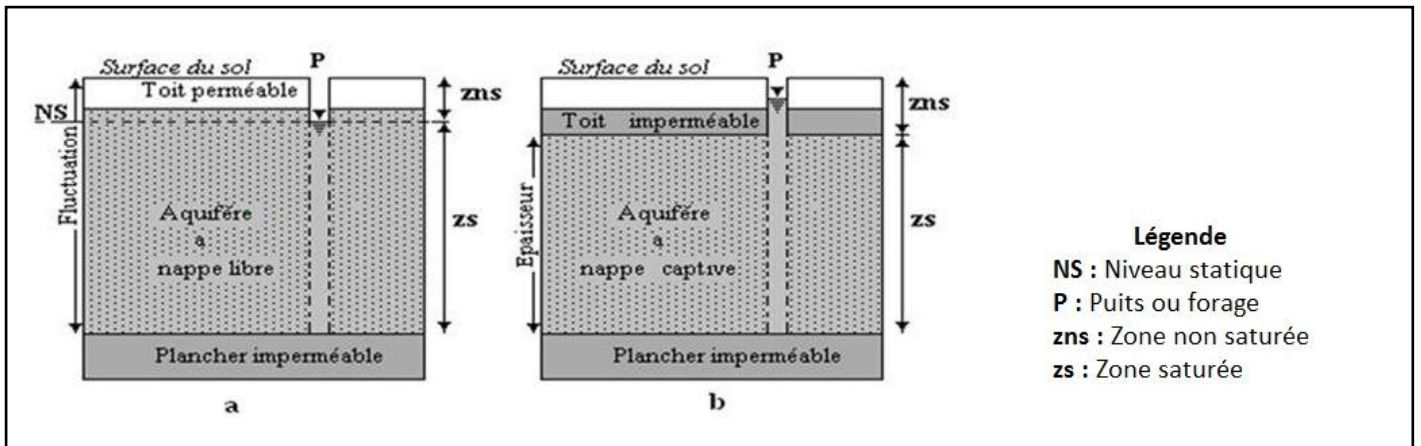
II-3-2 Hydrogéologie [3] [17]

Par définition, un aquifère est une couche ou un massif de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice permettant l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère peut comporter une zone non saturée (Castany, 1982 ; 1987).

Connaissant que la nappe est l'ensemble des eaux contenues dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Margat et al, 1982), son existence est conditionnée par la combinaison de trois facteurs : l'alimentation en eau ou recharge, la nature lithologie et la structure (poreuse, fracturée, etc.). Ainsi, on peut distinguer trois types de nappes :

- **nappe libre**, formée par le complexe couche hydrogéologique perméable-eau souterraine en dessous de la surface du sol et reposant sur le substratum imperméable, la surface piézométrique se confond avec la surface de la nappe et peut fluctuer librement ;
- **nappe captive**, constituée par la complexe formation hydrogéologique perméable - eau souterraine reposant sur le substratum imperméable et sous un toit imperméable, la surface piézométrique est supérieure à ce toit ;
- **nappe semi-captive**, aquifère reposant sur un substratum imperméable et sous un toit semi-perméable, le toit permet l'intercommunication avec la nappe sus-jacente. La surface piézométrique fluctue en fonction de la recharge et de vidange ;

La figure 10 ci-dessous présente la structure des deux types de système aquifère à nappe libre (a) et à nappe captive (b).



Source : Raonimaharivo (2010)

Figure 10 : Différents types de systèmes aquifères

Les caractéristiques des nappes de la Régions Sava sont présentées dans le tableau 7 ci-après.

Tableau 7 : Caractéristiques hydrodynamiques des nappes de la Région SAVA

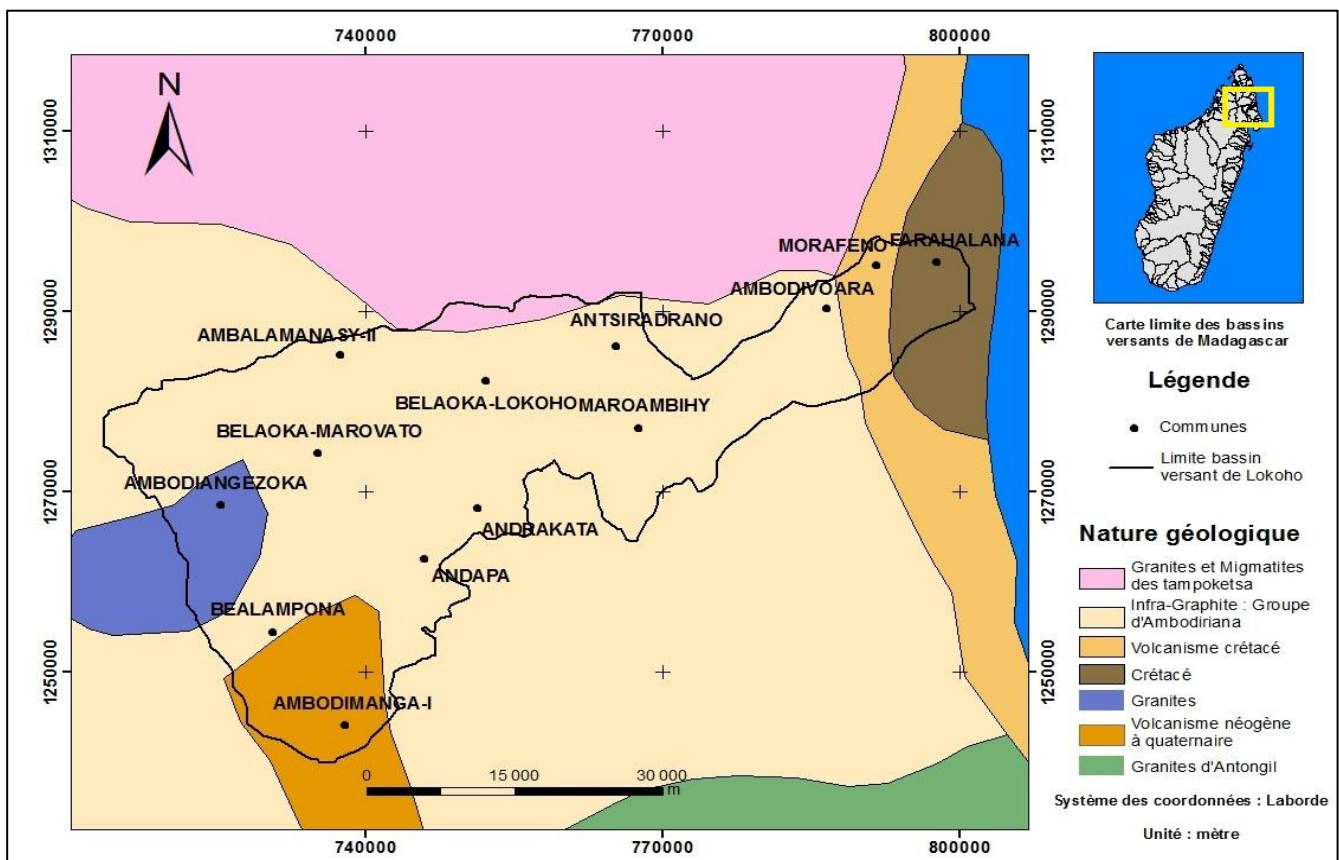
Nature des Nappes	Caractéristique des Nappes
Nappe libre des Altérites et Alluvions	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation par les précipitations, - Infiltration rapide, - Porosité importante, - Perméabilité faible, - Peu minéralisées (cond. <100 $\mu\text{s/cm}$), - Circulation très lente.
Nappe semi captive des arènes granitiques	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation par drainance descendante, - Infiltration rapide, - Porosité assez moyenne, - Perméabilité importante, - Minéralisation moyenne (200 $\mu\text{s/cm}$ < cond. < 600 $\mu\text{s/cm}$) - Circulation lente.

<p>Nappes du socle fracturé</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation par drainance descendante, - Infiltration rapide, - Porosité faible, - Perméabilité importante, - Minéralisation importante (600 $\mu\text{s/cm}$ < cond. < 1000 $\mu\text{s/cm}$) parfois plus, - Circulation rapide.
--	--

Source : Raonimaharivo (2011)

II-4 CONTEXTE GEOLOGIQUE [9] [13]

Dans des temps géologiques, le bassin versant de la Lokoho a une origine volcanique, transformée par le temps en lac, puis en marécages lors de la venue des premiers habitants au XIXème siècle (Neuvy, 1979). Le bassin résulte de mouvements tectoniques ayant affecté le substratum formé de roches métamorphiques parmi lesquelles les plus récentes sont probablement contemporaines du volcanisme quaternaire qui a laissé des filons basaltiques dans le secteur méridional.



Source : BD 500 FTM

Figure 11 : Carte géologique du bassin versant de Lokoho et ses environs

On distingue deux grandes catégories de terrains :

- **terrains sédimentaires** formés principalement par des apports fluviaux et éoliens. Ces terrains relativement récents se sont emboîtés dans des couches plus anciennes et qui constituent la plus grande partie d'une étroite plaine côtière. Cette plaine, constituée de terrains sédimentaires repose en grande partie sur un socle précambrien ;
- **terrains cristallins** formés par de différents types de roches telles que les granites, les gabbros et les migmatites qui se sont formées à la surface où à l'intérieur de la terre quand elles sont d'origine volcanique.

II-5 CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

II-5-1 Contexte social

II-5-1-1 Population [9] [36]

La population est inégalement répartie dans les quatre Districts de la Région : 32% à Sambava, 26% à Antalaha, 22% à Vohémar et 20% à Andapa. Les densités varient respectivement de 44 hab/km² à Sambava, 32 hab/km² à Andapa, 30 hab/km² à Antalaha et 18 hab/km² à Vohémar.

Tableau 8 : Répartition spatiale de la population de la Région SAVA (2001)

District	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité (hab/km ²)
Sambava	237 488	4 780	50
Antalaha	186 322	7 085	26
Vohémar	169 687	8 024	21
Andapa	147 772	4 444	33

Source : Monographie de la Région du SAVA (2003)

Le District d'Andapa compte 17 Communes, la répartition des habitants dans les différentes Communes est représentée dans le tableau 9 ci-après.

Tableau 9 : Population dans chaque Commune du District d'Andapa (2001)

Commune	Nombre d'habitant	Commune	Nombre d'habitant
Ambalamanasy II	24 211	Anoviara	10 667
Ambodiangezoka	26 673	Antsamena	3 418
Ambodimanga	6 893	Bealampona	11 976
Andapa Chef-lieu	27 618	Belaoka Marovato	8 463
Andrakata	15 401	Betsakotsako Andranotsara	6 314
Andranomena	4 038	Doany	19 928
Anjialava Be	5 528	Marovato	5 747
Ankiaka Be Nord	8 253	Matsohely	7 565
Anoviara	10 667	Tanandava	6 152
Antsamena	3 418	Total des 17 Communes	147 772

Source : Monographie de la Région du SAVA (2003)

En 2001, Andapa compte environ 147 772 habitants.

II-5-1-2 Santé [9]

Chaque District dispose d'un Centre Hospitalier de District (CHD) public ou privé. Le nombre de CSB et de CHD est représenté dans le tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 : Infrastructures sanitaires (1999)

District	Secteur public				Secteur privé			
	CSB I	CSB II	CHD I	CHD II	CSB I	CSB II	CHD I	CHD II
Sambava	9	23	0	1	0	4	0	0
Antalaha	16	9	0	1	1	4	0	0
Vohémar	23	8	0	0	1	1	0	1
Andapa	8	14	1	0	1	0	0	1
Région	56	54	1	2	3	9	0	2

Source : SISG - Min SAN (1999)

II-5-1-3 Besoin en eau potable [1]

L'analyse de la situation du secteur de l'eau et de l'assainissement réalisée par la Direction des Eaux du Ministère de l'énergie et des Mines, dans le cadre du Programme National de Lutte contre la pauvreté (2002) souligne une répartition non équilibrée en nombre

d'infrastructures entre les différentes provinces, dont la Région SAVA est la plus défavorisée dans la province d'Antsiranana.

Le taux d'accès de la population à l'eau courante, à la pompe publique, à la pompe aspirante et aux puits serait de 3,8% seulement pour l'ensemble de la province contre un taux de 36,9% pour l'ensemble de Madagascar. L'approvisionnement en eau de la Région est résumé dans le tableau 11 qui suit.

Tableau 11 : Approvisionnement en eau de la Région SAVA (2002)

District	Eau Courante	Pompe Publique	Pompe aspirante	Puits	Camions citernes	Source	Cours d'eau	Autres
Sambava	237	1 507	94	9 927	61	8 803	21 801	118
Antalaha	770	3 144	48	6 810	43	8 572	13 146	289
Vohémar	503	1 061	259	5 205	27	4 515	18 128	486
Andapa	309	3 898	69	3 043	35	7 843	9 852	98

II-5-2 Contexte économique

Source : PNUD MAG/97/007 (2002)

II-5-2-1 Agriculture [9]

La Région de la SAVA possède un potentiel agronomique important dû à ses conditions climatiques humides et à l'aptitude des sols favorables à toutes cultures tropicales et tempérées. La répartition des surfaces cultivables et cultivées par District est présentée dans le tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12 : Répartition des surfaces cultivables et cultivées par District (2001)

District	Surface totale (ha)	Surface cultivable (ha)	Surface cultivée (ha)	Pourcentage de surface cultivable (%)
Sambava	503 400	161 088	55 962	30
Antalaha	584 200	176 057	37 959	22
Vohémar	898 800	771 800	46 414	5
Andapa	428 500	202 450	41 097	23
Région	2 414 900	1 311 395	181 412	13

Source : Annuaire Statistique Agricole (2001)

D'après ce tableau, une forte potentialité de développement agricole est constatée par District, la superficie cultivable représente plus de la moitié de la superficie totale de la Région. En ce qui concerne les surfaces cultivées, une évolution progressive peut être perçue.

Andapa, le grenier à riz de la Région Nord de Madagascar n'a pu mettre en valeur que 23% de ses terrains cultivables, contre 25% pour les autres Districts.

La répartition de la superficie par spéculation est donnée dans le tableau 13 ci-dessous :

Tableau 13 : Répartition de la superficie par spéculation (2001)

District	Surface totale cultivée (ha)	Culture vivrier (ha)	Culture de rentes (ha)	Culture industriel (ha)	Autres (fruits, légumes,...) (ha)
Sambava	56 030	24 695	18 795	7 443	5 097
Andapa	42 773	23 681	10 875	435	7 782
Vohémar	36 244	20 775	6 940	1 179	7 350
Antalaha	36 129	19 435	9 205	1 774	5 715
Région	172 176	89 586	45 815	10 831	25 944

Source : Annuaire Statistique Agricole (2001)

Les superficies cultivées sont donc inégalement réparties selon les types de spéculation. Les cultures vivrières occupent généralement plus de 50% des superficies cultivées, 70% à Vohémar et 55% à Sambava alors que les cultures industrielles et les cultures maraîchères ne couvrent même pas 1%.

II-5-2-2 Elevage [9]

L'élevage bovin est le plus pratiqué dans la plupart des Districts. L'élevage porcin n'est présent significativement que dans les Districts d'Antalaha, de Sambava et d'Andapa. Concernant les ovins et les caprins, leur élevage se fait généralement dans la discrétion.

L'aviculture est présente dont plus de la moitié des exploitations sont des poulets, et dans une moindre mesure les canards (30%).

Quant à la pisciculture, on enregistre près de 7% des exploitations dans le District d'Andapa.

L'évolution du nombre d'animaux par type d'élevage dans le bassin versant de la Lokoho est donnée dans le tableau 14 ci-dessous :

Tableau 14 : Evolution du nombre d'animaux par type d'élevage dans le bassin versant Lokoho (2005-2012)

Type d'élevage	Année							
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Elevage de bovin	75 156	90 060	105 750	107 175	111 540	124 899	133 890	142 890
Elevage de porc	7 199	5 055	5 223	5 415	5 253	5 430	5 850	6 270
Elevage d'ovin	30	31	32	33	35	36	37	37
Elevage de caprin	463	472	514	561	649	693	731	774
Elevage de volaille	99 488	101 876	104 364	106 866	109 425	113 824	118 400	123 160

Source : MAEP Ampandrianomby-Antananarivo (2013)

II-5-2-3 Pêches et ressources halieutiques [9]

Avec les 300 km de côte, ses lacs et ses rivières, la Région SAVA remplit les conditions pour être une zone de prédilection de la pêche et les ressources halieutiques tant maritimes que continentales non négligeables. Pourtant la situation est telle que l'on y rencontre 3 secteurs mal ou insuffisamment nantis en moyens matériels et humains : les pêches traditionnelle, artisanale et industrielle.

a) Pêche traditionnelle

Dans les meilleurs des cas, elle se pratique avec des embarcations non motorisées sur les lagunes se présentant en une étroite bande de mer. Généralement ce secteur de pêche se pratique pour la majorité des pêcheurs à pied aux abords de l'eau.

Le tableau 15 suivant fait ressortir la répartition des moyens matériels et humains de la pêche traditionnelle.

Tableau 15 : Répartition des moyens matériels et humains (1990)

	Eau douce			Eau estuaire			Eau de mer		
	Pirogue	Pêcheurs	% District	Pirogue	Pêcheurs	% District	Pirogue	Pêcheurs	% District
Sambava	78	21	53,2	92	211	28,9	15	40	6
Antalaha	32	85	21,5	224	321	44	44	121	18,1
Vohémar	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Andapa	26	100	25,3	109	198	27,1	263	509	76
TOTAL	136	395	100	425	730	100	322	670	100

Source : PADANE - DRA Antalaha (1990) 26

La production de la SAVA est essentiellement destinée à la vente locale et à l'autoconsommation (Monographie SAVA, 2003).

b) Pêche artisanale

La pêche artisanale est pratiquée à bord d'embarcations motorisées et toutes les méthodes de pêche sont permises. Elle compte une dizaine d'embarcations motorisées sur les 60 que compte dans le Province d'Antsiranana. Sur les 10 embarcations dans la Région SAVA, 5 sont fonctionnelles à Vohémar, 3 à Antalaha et 2 autres à Sambava (Monographie SAVA, 2003).

c) Pêche industrielle

Elle n'est pas pratiquée dans la SAVA. Aucun produit des embarcations de la pêche industrielle n'est débarqué à Antalaha. Même si les bateaux du secteur industriel croisent au large de la côte est, aucune incidence ne peut être signalée localement (Monographie SAVA, 2003).

Ces données et informations sont obtenues soit par documentation soit par collecte au niveau des Institutions travaillant dans le secteur eau et assainissement. Comme tous les autres bassins versants de Madagascar, le bassin versant de Lokoho risque des pénuries d'eau dans les années à venir. De plus, des séries de données sur le bassin versant sont disponibles. En outre, le bassin versant de Lokoho a été choisi pour l'étude de vulnérabilité des ressources en eau lors de l'élaboration deux dernières communications nationales (Min eau 2008, 2012) sur le changement climatique de Madagascar sans utilisation des modèles. Ce sont des raisons pour lesquelles ce bassin est choisi pour appliquer le modèle WEAP pour une gestion intégrée des ressources en eau.

TROISIEME CHAPITRE :
MODELISATION
HYDROLOGIQUE DU BASSIN
VERSANT DE LA LOKOHO

Actuellement, plusieurs logiciels sont disponibles pour la modélisation hydrologique. Comme l'HYDROM qui permet d'évaluer les ressources en eau de surface, le PLUVIOM pour évaluer les précipitations, tous les deux sont créés et utilisés par l'ORSTOM, et certains modèles comme MODFLOW créé par la SDEC France, GWW inventé par l'Etude Géologique des Etats-Unis (USGS), AQUACHEM développé par le Service de l'Eau de Schlumberger, qui sont utilisés pour l'eau souterraine.

Dans ce présent mémoire, nous avons choisis le modèle WEAP21 pour établir une gestion intégrée et durable des ressources en eau du bassin versant de Lokoho. En effet, la capacité et le côté pratique de ce logiciel permet une plus grande exploitation et ainsi une modélisation plus probante.

Dans ce chapitre, nous allons voir la structure du modèle et ses fonctionnements.

III-1 PRESENTATION DU LOGICIEL WEAP21

III-1-1 Description du logiciel WEAP21 [35]

WEAP ou « *Water Evaluation and planning System* » (ou Système d'Evaluation et de Planification des Ressources en Eau) est créé par *Stockholm Environment Institute* (SEI) (Institut de l'Environnement de Stockholm) par les chercheurs : Jack Seiber, *Water System Modeler* (Spécialiste en Modélisation du système de l'eau) ; Chris Swartz, *Research Associate* (Associé de Recherche) et Annette Huber – Lee, *Director Water Program Stockholm Environment Institute* (Directeur du Programme sur l'Eau de l'Institut de l'Environnement de Stockholm). L'Institut de l'Environnement de Stockholm a fournis le support fondamental pour le développement de WEAP, et le « *Hydrologic Engineering Center of the US Army Corps of Engineers* » (Centre d'Ingénierie Hydrologique des Ingénieurs des Corps D'armée des Etats-Unis) a financé des améliorations significatives. Des agences, incluant la Banque Mondiale, USAID et le « *Global Infrastructure Fund of Japan* » (Fonds d'Infrastructure Globale du Japon) ont fourni des projets supports.

WEAP est un outil de planification intégrée des ressources en eau pour microordinateurs. Il vise l'incorporation des projets de distribution d'eau dans le contexte des questions de la demande, la qualité de l'eau et de la préservation des écosystèmes dans un outil pratique pour la planification des ressources en eau. WEAP est un logiciel complet, simple et facile d'utilisation privilégie l'assistance plutôt que la substitution des planificateurs expérimentés. De plus, il permet de traiter une large gamme de questions telles que :

- l'analyse sectorielle de la demande ;
- la préservation de l'eau ;
- le droit à l'eau et les priorités d'allocation ;
- la simulation des eaux souterraines et de surface ;
- la gestion des retenues ;
- la production d'énergie hydraulique ;
- le suivi des caractéristiques physico-chimiques et des pollutions ;
- les exigences des écosystèmes ;
- les mesures de vulnérabilité ;
- les analyses de bénéfice - coût des projets.

III-1-2 Acquisition et installation

Pour acquérir le logiciel, il faut aller dans le site web de WEAP sur le lien <http://www.weap21.org> et remplir le formulaire. Ensuite, un lien est obtenu par email marqué lors du remplissage. On téléchargera le logiciel à partir de ce lien. Après l'installation, le logiciel obtenu est fonctionnel excepté le dispositif « économiser données ». Mais si on veut que ce dispositif fonctionne, il faut obtenir un permis ou licence d'utilisation pour les types d'utilisateur. En effet, un nom d'utilisateur et un code d'enregistrement sont demandés au démarrage du logiciel.

Pour permettre la fonctionnalité du dispositif "économiser données", il faut demander le nom d'utilisateur et le code d'enregistrement à SEI (*Stockholm Environment Institute*). Si la demande est acceptée, les instructions, le nom d'utilisateur et le code d'enregistrement seront envoyés par e-mail pour activer le logiciel WEAP. Le permis d'utilisation gratuit est valide pour une durée déterminée.

Il y a aussi le forum WEAP sur le lien <http://forums.seib.org/weap> où les utilisateurs peuvent se communiquer. Un pseudo et un mot de passe sont nécessaires pour entrer dans ce forum, ils sont délivrés avec le lien du téléchargement du logiciel après le remplissage du formulaire. Le forum peut aider l'utilisateur pendant la mise en marche du logiciel, le traitement de données et la mise à jour du logiciel.

Il faut noter que SEI peut publier les travaux de modélisation sous WEAP et souhaite avoir une version de la présente modélisation.

Certaines conditions doivent être remplies pour acquérir le logiciel :

- la licence gratuite est appliquée uniquement pour les employés ou étudiants d'organisations gouvernementales, académiques ou non lucratives, basées dans les pays en voie de développement ;
- les organisations gouvernementales à profit ne sont pas qualifiées pour cette licence. Chaque licence est pour une période de 1 à 2 ans, et pour un seul utilisateur ou plusieurs utilisateurs au même site ;
- aucune copie du logiciel ou des informations requises pour déverrouiller le logiciel ne doivent être distribués à tout autre individu ou organisation ;
- tous les utilisateurs de WEAP doivent accepter la déclaration de garantie.

III-1-3 Structure du modèle

WEAP présente cinq principales modes d'affichage : cartographie, données, résultats, schémas synoptiques et notes.

III-1-3-1 Cartographie

Cet affichage contient des outils basés sur les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) pour une configuration facile du système. Les objets (tels que les nœuds de demande, les retenues) peuvent être créés et placés dans le système par les opérations : sélectionner, glisser et coller des articles à partir d'un menu. Des fichiers image (raster) ou vecteur obtenus par *ArcView* ou d'autres outils SIG standard peuvent être ajoutés au schéma comme arrière-plan. On peut accéder rapidement aux données et aux résultats de n'importe quel nœud en cliquant sur l'objet concerné.

III-1-3-2 Données

L'affichage des données permet de créer des variables et des relations, et d'entrer des hypothèses ou des projections utilisant des expressions mathématiques et des relations dynamiques avec Excel. C'est dans cette fenêtre qu'on peut introduire toutes les données qu'on veut simuler.

III-1-3-3 Résultats

La vision des résultats permet un affichage détaillé et flexible des sorties du modèle sous forme de graphes, de tableau ou de schéma. On peut choisir les types de résultats qu'on veut voir comme : la demande ou besoins en eau, les exigences de débit, etc... Tout en choisissant l'année, les scenarios, et les branches qu'on veut présenter.

III-1-3-4 Schéma synoptique

Dans cet affichage, on peut mettre en relief les indicateurs clés dans le système pour une vision rapide. On aura une vue d'ensemble de tous les résultats qu'on souhaitera voir simultanément.

III-1-3-5 Notes

L'affichage « Note » offre une place pour documenter les données et les hypothèses. On peut noter les informations utiles concernant les différentes branches qu'on a introduites.

La fenêtre présentant les 5 affichages est donnée par la figure 12 ci-dessous.

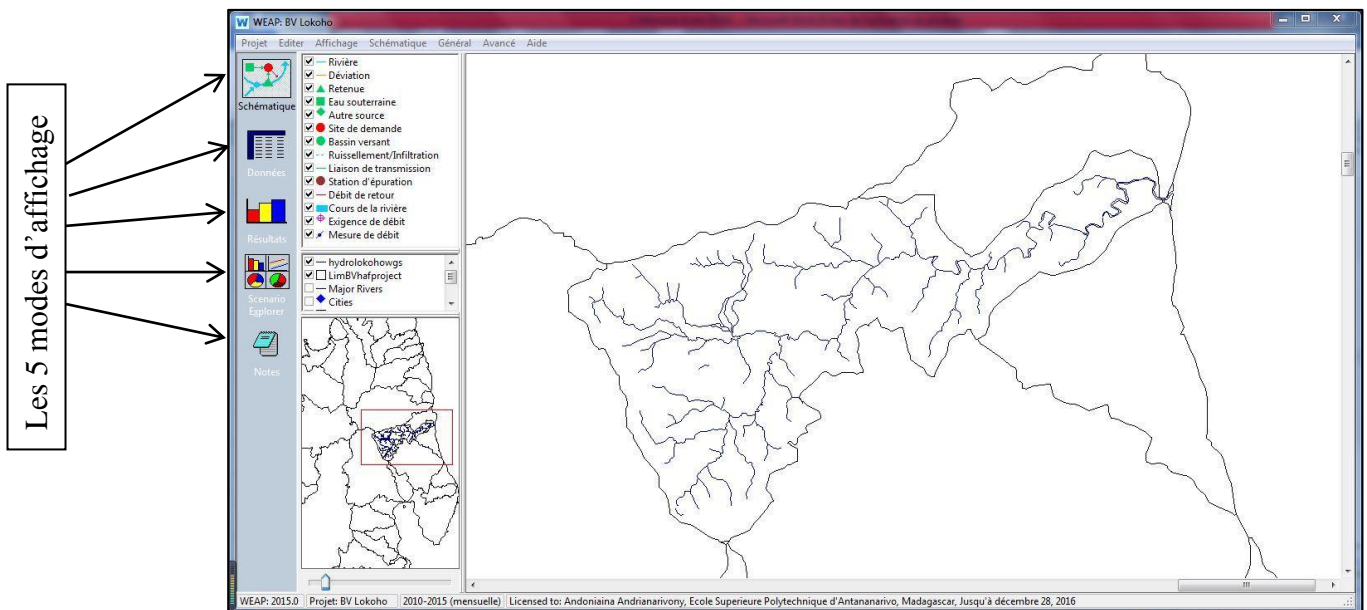


Figure 12 : Fenêtre montrant les cinq affichages possibles du modèle

III-1-4 Principe de fonctionnement

Pour faciliter la compréhension du modèle WEAP, il est accompagné d'un tutorial qui guide l'utilisateur à travers la large gamme d'applications qui peut être couverte par WEAP. Les applications de WEAP incluent généralement plusieurs étapes. Etant donné que la

fonction modélisation est celle qui nous intéresse, nous allons montrer ici les étapes à suivre à cet effet.

III-1-4-1 Création d'un nouveau projet d'étude

La création d'un nouveau projet est la première étape de la modélisation par WEAP21. Ensuite, on sélectionne la limite de la zone à représenter pendant le projet. Une carte SIG image ou vecteur peut être ajoutée à la zone du projet. Cette carte peut servir à l'orientation et à la construction du système et au raffinement des limites du projet. Elle va aussi servir comme fond des dessins des éléments nécessaires pour pouvoir effectuer la simulation.

III-1-4-2 Définition des paramètres généraux

Il faut définir les paramètres généraux de la modélisation dont les années (début et fin de la modélisation), les pas de temps, les unités et la période pour laquelle les scénarios vont être générés. L'année de début correspond à l'état actuel du projet. Elle est choisie pour servir comme année de base ou de référence du modèle et de tous les systèmes d'information.

III-1-4-3 Création des hypothèses clés

Les hypothèses clés sont des données prêtes à être utilisées définies par l'utilisateur qui servent de conditions principales pour l'analyse comme l'utilisation d'eau domestique, les besoins en eau pour les sites de demande, le pourcentage mensuel d'utilisation d'eau, le taux de croissance de la population, etc. Son utilisation est spécialement valable lorsque le modèle a un grand nombre d'éléments semblables. Elles sont créées dans l'affichage « Données ».

Son avantage est qu'on peut créer des scénarios pour faire varier cette consommation sans avoir besoin d'éditer chacun des sites de demande mais simplement par le changement de la valeur de l'hypothèse clé. Par exemple, on peut facilement affecter à tous les sites de demande la même consommation domestique unitaire.

III-1-4-4 Introduction des éléments dans la cartographie

C'est dans cette étape que l'on dessine les éléments articulatoires de la modélisation tels que : la rivière, les sites de demande, connexion du site avec une alimentation (rivière ou eau souterraine), liaison de débit de retour etc... Pour ce faire, il faut aller dans l'affichage schématique et cliquer sur l'élément que l'on veut ajouter, tout en glissant dans le schéma.

III-1-4-5 Entrée ou saisie des données de chaque élément

Pour entrer les données concernant les éléments, on peut soit :

- cliquer sur le bouton droit de la souris sur l'élément et choisir l'option « Editer les données » ou toute autre action dans le menu contextuel ;
- passer à l'affichage « Données » en cliquant sur le symbole « Données » et sélectionner l'élément dans l'arborescence des données et entrer les données.

III-1-4-6 Exécution du modèle et affichage des résultats

Pour voir les résultats, il faut exécuter le modèle. Il faut aller à la fenêtre « Résultats » pour démarrer les calculs. Ceci va calculer le modèle pour le scénario généré par l'utilisation des données à l'état actuel pour la période du temps spécifiée du projet. On peut voir plus de résultats comme la demande en eau, l'eau distribuée, le recouvrement, la demande non satisfaite, etc. Tout en choisissant, l'année, la référence, le scénario que l'on veut montrer. On peut aussi paramétrer l'affichage des graphiques WEAP aussi bien l'impression que les copies en mémoire en utilisant la boîte à outils à droite du graphique.

La fenêtre d'affichage des résultats est présentée dans la figure 13 ci-dessous.

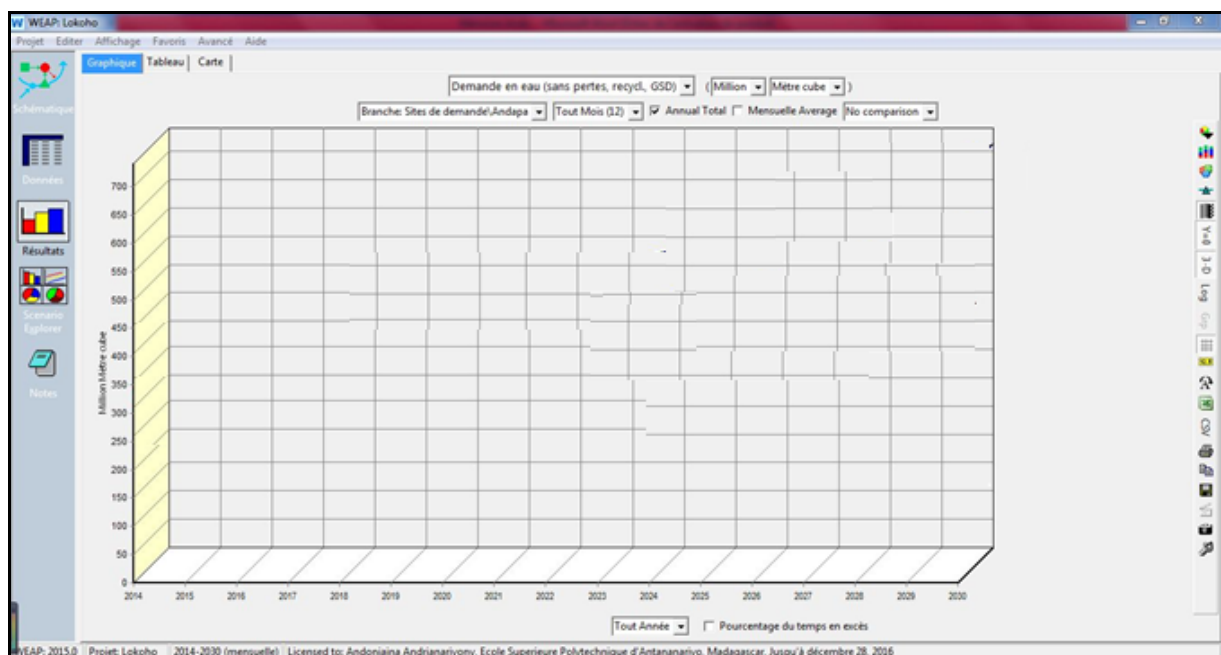


Figure 13 : Fenêtre d'affichage des résultats du modèle

III-2 APPLICATION DU MODELE « WEAP21 » AU BASSIN VERSANT DE LA LOKOHO

L'acquisition des données à simuler constitue l'étape primordiale dans la réalisation de la modélisation dans le logiciel WEAP. Les données utilisées ici sont récoltées à partir d'une

étude menée en Juin 2014 dans le cadre de l'élaboration de la Troisième Communication Nationale sur le changement climatique de Madagascar. Certaines sont recueillies au niveau des institutions travaillant dans le secteur Eau et Assainissement. Ces données concernent :

- les réserves et ressources en eau ;
- les caractères physico-chimiques et bactériologiques ;
- les sites de l'offre ou captage et les sites de demande ;
- les besoins en eau des sites de demande.

III-2-1 Présentation des données [1]

III-2-1-1 Sites de demande

Les données à entrer dans les sites de demande sont :

- le niveau d'activité annuelle représentant le nombre des personnes, des animaux et la surface cultivée consommateurs d'eau ;
- la consommation d'eau annuelle ou la consommation d'eau par unité d'activité ;
- la variation mensuelle ou la part mensuelle de la demande annuelle ;
- la consommation représentant le pourcentage de débit disparu dans le système.

Il est à noter que la consommation d'eau par les industries n'a pas été considérée dans la mesure où le bassin versant de la Lokoho n'abrite pas de grandes industries utilisatrices et polluantes d'eau. Néanmoins, il faut mentionner que l'exploitation minière artisanale commence à fleurir dans le District d'Andapa. Or, ce secteur constitue un des plus grands consommateurs d'eau. Toutefois, faute de données fiables sur le sujet, une modélisation n'a pas pu se faire dans ce sens, même s'il va sans dire que ce dernier sera un consommateur d'eau majeur de la Région, à prendre en considération dans les années à venir.

Les sites de demande avec leurs informations respectives sont présentés dans le tableau 16 ci-après.

Tableau 16 : Sites de demande avec les informations

Site de demande	Niveau d'activité annuelle	Consommation d'eau annuelle	Variation mensuelle	Consommation
Populations				
Pop. Andapa 1	100 169 hab	11 m ³ /hab/an	Proportionnelle au nombre de jours dans un mois	15%
Pop. Andapa 2	524 hab	11 m ³ /hab/an		
Bassin Lokoho	47 079 hab	11 m ³ /hab/an		
Cultures				
Riz	18 800 ha	35 040 m ³ /ha/an	Avril : 5% Mai-Juin : 10% Juillet : 20% Août : 30% Septembre : 25% Octobre-Mars : 0%	90%
Maïs	425 ha	4 015 m ³ /ha/an		
Haricot	286 ha	8 395 m ³ /ha/an		
Manioc	965 ha	15 330 m ³ /ha/an		
Patate douce	70 ha	12 775 m ³ /ha/an		
Elevages				
Bovin	142 890	10,9 m ³ /tête/an	Proportionnelle au nombre de jours dans un mois	10%
Porcin	6 270	6,4 m ³ /tête/an		
Ovin	37	2,2 m ³ /tête/an		
Caprin	774	2,2 m ³ /tête/an		
Volailles	123 160	0,1 m ³ /tête/an		
Eductions	Nombre d'élèves EPP+CEG+LYCEE 25 382	9,12 m ³ /élève/an	Proportionnelle au nombre de jours dans un mois	10%
Santé	Nombre de patients 750	146 m ³ /patient/an	Proportionnelle au nombre de jours dans un mois	15%

Source : Andrianirina et al (2014)

III-2-1-2 Eaux de surface disponibles [1] [4] [13]

Le régime d'écoulement des cours d'eau est très dépendant des précipitations. Ainsi, les crues s'observent pendant la saison pluvieuse (Décembre à Mars) et surtout lors du transit de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) sur la Région Nord du pays et lors des passages des perturbations tropicales. L'étiage de ces cours d'eau a lieu pendant les mois de Mai à Octobre.

Les débits lors des pluies cycloniques importantes dépassant 200 L/m² en 24 h sont estimés à plus de 2 000 m³/s au seuil de la Lokoho (Neuvy, 1977), à la sortie de la cuvette. Les débits spécifiques d'étiage sont faibles, de l'ordre de 11,8 à 33,1 L/s/km². Le débit spécifique moyen annuel est estimé entre 20 et 33 L/s/km².

La variation des débits moyens mensuels (1965-1981) à Andapa (14°37'00''S ; 49°40'30''E) est présentée dans le tableau 17 ci-après :

Tableau 17 : Variation des débits moyens mensuels à Andapa (1965-1981)

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sep	Oct	Année
Q (m ³ /s)	32,3	60,8	129	120	85,6	51,1	36,1	28	29,1	35,1	24,8	22,3	54,2

Source : Danloux (1991) ; Chaperon et al (2005)

Cette station contrôle une surface de 1 040 km² du bassin versant où une prise dérive en moyenne 7,5 m³/s d'eau pour irriguer 5 000 à 7 500 ha avec un débit maximal de 129 m³/s au mois de Janvier, un débit minimal de l'ordre de 22 m³/s et un moyen annuel de 54 m³/s.

III-2-1-3 Eaux souterraines disponibles

a) Nappes souterraines [1]

Dans la zone Nord, les ressources en eaux souterraines sont essentiellement composées de :

- nappes des sables argileux alluviales ;
- nappes des altérations (formées par des sables micacés argileux) ;
- nappes de socle cristallin fissuré ;
- nappes des terrains volcaniques.

Le régime pluviométrique dans la cuvette d'Andapa montre que le bassin reçoit en moyenne 1 858 L/m² d'eau de précipitations par année hydrologique, pour l'année de référence 1961 à 1990, soit 3,75.10⁹ m³/an dans l'ensemble du bassin (Andrianirina et al, 2014).

Et en considérant les caractéristiques des nappes souterraines (tableau 19), on trouve les informations ci-dessous (tableau 18).

Tableau 18 : Informations concernant les eaux souterraines

Capacité de stockage (m ³)	Prélèvement maximal (m ³)
70 000 000	24 000 000

Les caractéristiques des nappes souterraines sont données dans le tableau 19 ci-après :

Tableau 19 : Caractéristiques des nappes souterraines de la zone Nord de Madagascar

Types de nappes	Caractéristiques		
	Niveaux statiques	Puissances	Débits spécifiques
Nappes des sables argileux Alluviales	2 à 5 m	5 à 10 m	0,14 à 0,5 L/s par mètre de profondeur
Nappes des altérations	2 à 3 m	5 m	0,2 à 0,5 L/s par mètre de profondeur
Nappes de socle cristallin Fissuré	2 à 3 m	10 m	0,8 à 1,4 L/s par mètre de profondeur
Nappes des terrains Volcaniques	Varié	10 m	2 à 5 L/s par mètre de profondeur

Source : Andrianarina et al (2014)

En supposant que l'infiltration en moyenne annuelle de pluie est de 10% des précipitations P (SOGREAH INGENIERIE, 1995) soit $1,8.10^7$ m³/an, on trouve la recharge naturelle des eaux souterraines. Elle est présentée dans le tableau 20 ci-dessous.

Tableau 20 : Recharge naturelle mensuelle des nappes souterraines

Mois	Recharge naturelle (m ³)	Mois	Recharge naturelle (m ³)
Janvier	4 793 685	Juillet	594 425
Février	4 092 465	Août	721 370
Mars	2 907 645	Septembre	0
Avril	771 745	Octobre	0
Mai	0	Novembre	0
Juin	318 370	Décembre	2 839 135

b) Réservoir de la JIRAMA [2]

Dans WEAP, les réservoirs sont équivalents à des « retenues ». Les informations nécessaires concernant les retenues sont :

- le débit entrant par mois dans le réservoir local ;
- la capacité de stockage ou la capacité totale du réservoir ;
- le stockage initial ou la quantité stockée dans la retenue au début de la modélisation ;

- l'évaporation nette ou le taux d'évaporation nette mensuelle [E (évaporation) - P (précipitation)] à la surface de la retenue.

La caractéristique du réservoir de la JIRAMA est présentée dans le tableau 21 ci-dessous :

Tableau 21 : Caractéristiques du réservoir JIRAMA

JIRAMA	Débit entrant (m³/mois)	Capacité de stockage (m³)	Stockage initial (m³)
Andapa	7 750	250	250

Source : JIRAMA (2007)

En utilisant les données sur l'évaporation (tableau 5) et la précipitation (tableau 1), on trouve l'évaporation nette. Elle est présentée dans le tableau 22 ci-dessous :

Tableau 22 : Evaporation nette

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct
E mm	101	123	128	110	119	97	79	60	55	58	62	80
P mm	99,7	263,9	365,9	313,1	263,3	135,3	72,8	75,8	84,5	93,8	43,6	46,6
E-P mm	1,3	-140,9	-237,9	-203,1	-144,3	-38,3	6,2	-15,8	-29,5	-35,8	18,4	33,4

Source : Cabinet ECR (2013)

Les évaporations nettes négatives indiquent des apports d'eau.

III-2-1-4 Hydrologie [2]

Pour l'étude hydrologique, WEAP possède un « objet » appelé « bassin versant » qui est un secteur défini par l'utilisateur dans la vue schématique. Il permet la prise en compte de certains paramètres tels que la précipitation, l'évapotranspiration, l'écoulement, l'irrigation et les rendements, la qualité de l'eau, etc. Pour modéliser un bassin versant, WEAP comporte 3 modèles :

- modèle d'écoulement et précipitation ;
- modèle d'humidité du sol ;
- modèle d'interaction eau souterraine - eau de surface.

Dans cette étude, nous avons choisi le modèle d'écoulement et précipitation. Pour se faire, on a besoin des données sur :

- la surface cultivable dans le bassin ;
- le Kc ou coefficient de culture relatif à la plante de référence ;
- la précipitation effective ou le pourcentage de précipitations disponibles pour l'évapotranspiration ;
- la précipitation (P) ou la moyenne des précipitations mensuelles dans le bassin en considérant l'année 2000 comme année de référence ;
- l'évapotranspiration (ETR) ou l'évapotranspiration mensuelle d'un terrain de référence.

On va prendre la riziculture comme culture de référence car elle occupe la majeure partie de la surface cultivée dans la zone d'étude, avec une superficie de 18 800 ha et un coefficient de culture de 1,1% nécessitant des précipitations effective de 85%. Le climat correspondant est donné dans le tableau 23 ci-dessous.

Tableau 23 : Climat dans la culture de référence

Mois	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct
P (mm)	116,3	264,4	380,6	292,7	250,5	134,9	77,3	72,2	82	104,5	45,6	43,4
ETRéf (mm)	101	123	128	110	119	97	79	60	55	58	62	80

Source : Cabinet ECR (2013)

III-2-1-5 Qualité de l'eau [17]

Les eaux de surface sont très chargées en matières solides en suspension. De même, ces eaux ont une teneur notable en éléments chimiques à cause de l'altération chimique et le transport des minéraux arrachés du sol (érosion).

Par ailleurs, l'accessibilité aux données sur la qualité physico-chimique des eaux est très restreinte. Cependant, quelques caractéristiques physico-chimiques des points d'eau dans le bassin de la Lokoho sont présentées dans le tableau 24 ci-après.

Tableau 24 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux du bassin versant de la Lokoho

Types	Paramètres	Valeurs
Eaux de surface	pH	6,5 à 8,3
	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	60 à 1 000
	Turbidité	0,25 m
	MES (kg/m^3)	0,15
Eaux souterraines	pH	5,5 à 8,3
	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	60 à plus de 3 000
	T ($^{\circ}\text{C}$)	19 à 22
	Faciès	- bicarbonaté sodique/calcique/magnésien - chloruré sodique/magnésien
	Saveur	- douce - risque d'invasion marine en zone côtière
	Teneur en NO_3	0,001 à 21,8 mg/l
Teneur en NO_2	0,001 à 0,52 mg/l	

Source : PAEAR (2008) ; Raonimaharivo (2011)

III-2-2 Modélisation par WEAP21

Avant d'entamer la modélisation proprement dite, il est nécessaire de paramétrer le modèle selon l'objectif que l'on veut atteindre.

III-2-2-1 Cartographie du modèle

a) Création du projet

La première étape est la création du nouveau projet. Pour cela, il faut utiliser l'option « Nouveau projet » dans le menu principal « Projet » et nommer le projet « Bassin versant Lokoho », ensuite, sélectionner le contour de la zone d'étude sur la carte du monde (figure 14) qui apparaît. A ce moment, il est indispensable d'ajouter une couche SIG à la zone, qui sert de fond pour tracer les rivières, les sites de demande...

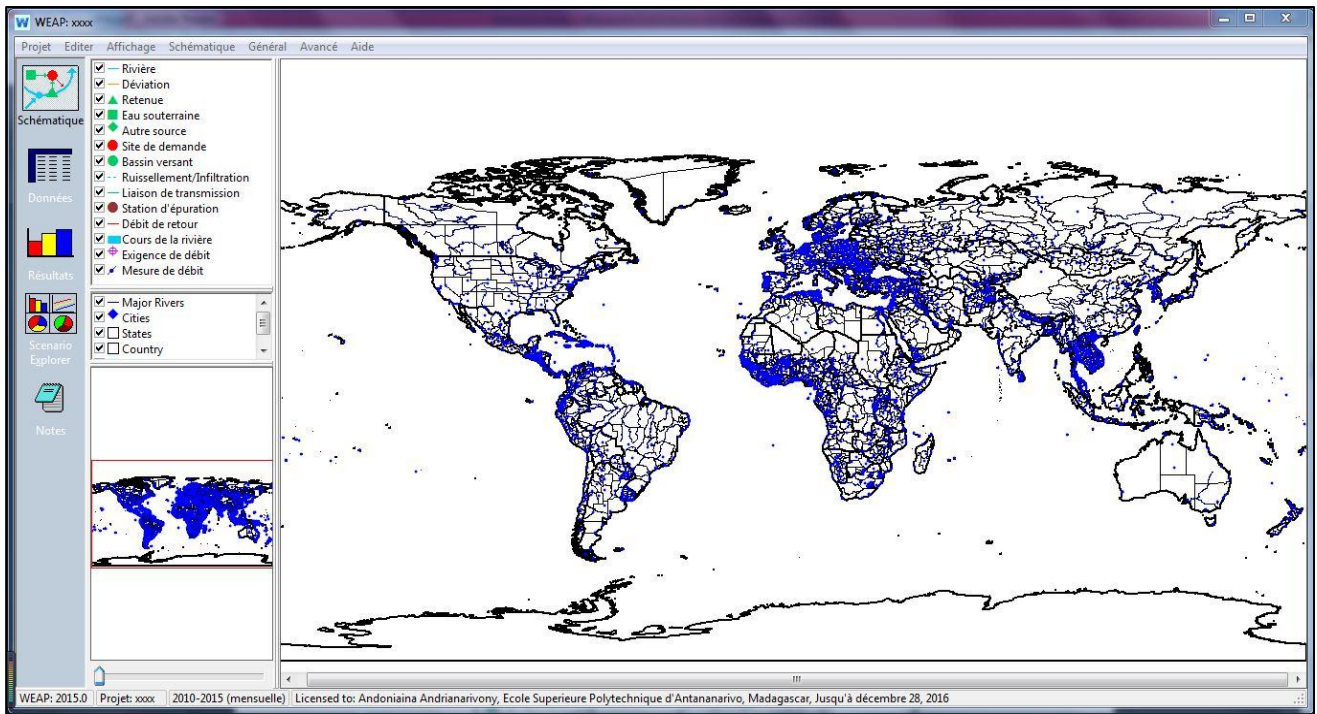


Figure 14 : Carte du monde intégrée dans WEAP

La fenêtre du projet bassin versant Lokoho est présentée par la figure 15 ci-dessous.

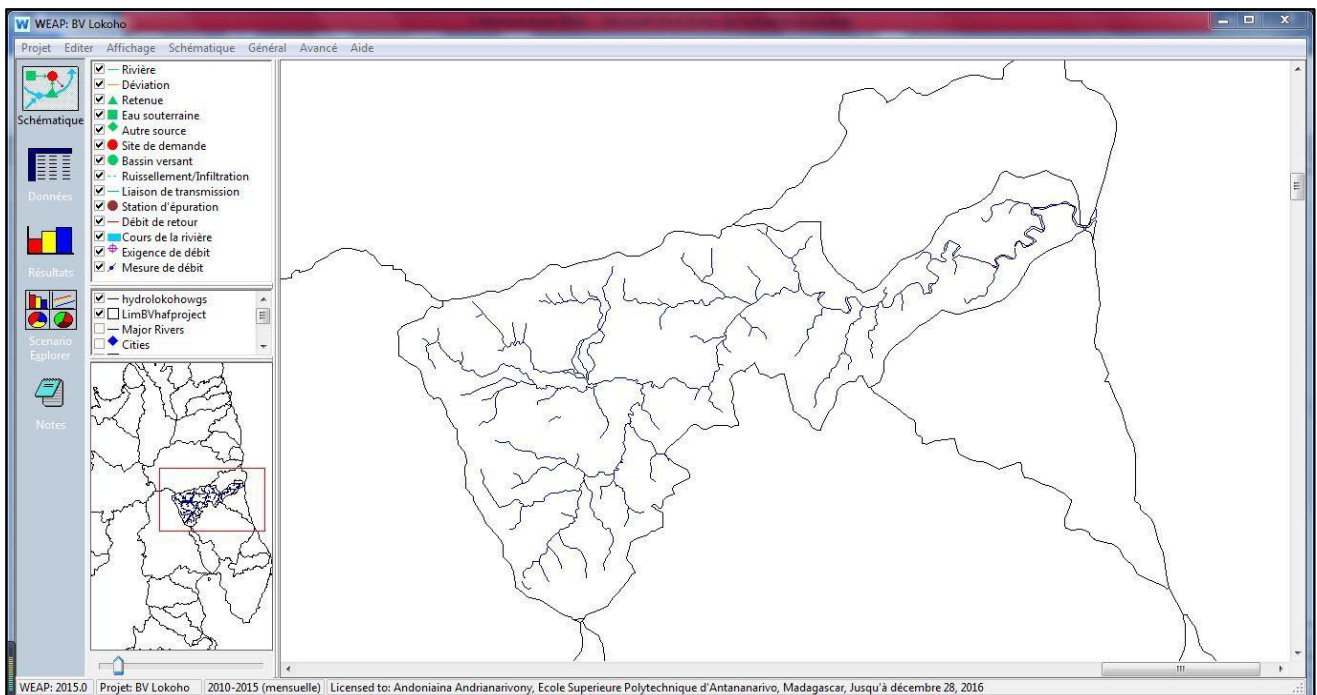


Figure 15 : Carte du bassin versant de la Lokoho avec les réseaux hydrographiques

b) Réglage des paramètres généraux

Dans WEAP, les paramètres généraux sont : les années et pas de temps, dans lesquels on ajoute l'année de l'état actuel qui est l'année de base pour la modélisation. Dans cette

étude, l'année 2000 est choisie comme l'année des comptes actuels et les scénarios sont construits à partir des données entrées en cette année. On projette la modélisation jusqu'en 2050. Il faut donc changer l'horizon temporel par défaut en 2000-2050.

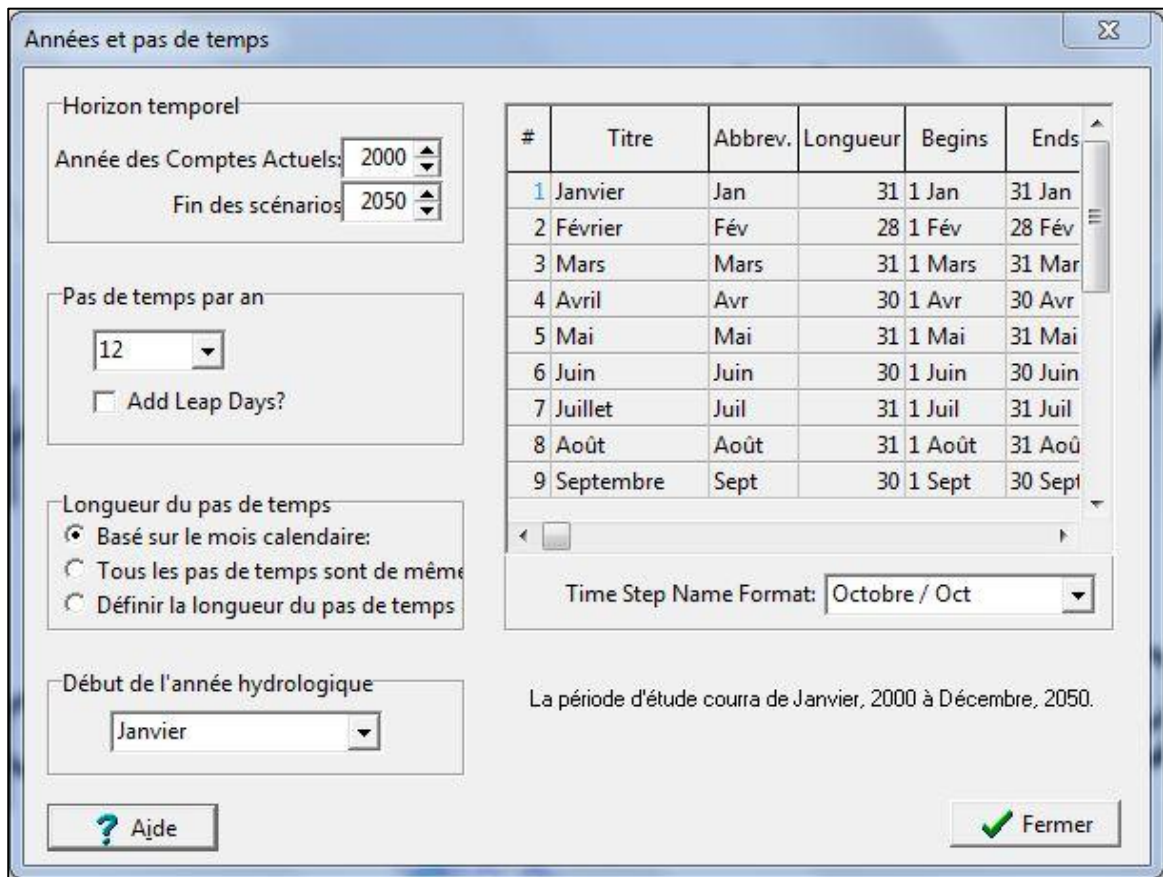


Figure 16 : Fenêtre de réglage des années et pas de temps

c) Numérisation des éléments du projet

Après le réglage des paramètres généraux, on passe à la numérisation des éléments, c'est-à-dire l'introduction des éléments constituant le schéma du projet tels que : les rivières, les sites de demande (emplacements urbains, agricultures, élevages,...), et l'introduction des données de chaque élément.

III-2-2-2 Raffinage des sites de demande

a) Sites de demande

Les sites de demande sont ajoutés dans la vue « schématique », ici on a créé 7 sites de demande. Ce sont : la population Lokoho, la population Andapa 1, la population Andapa 2, la santé, l'éducation, l'élevage et l'agriculture.

b) Ressources disponibles

Il y a 4 ressources en eau disponible dans le bassin :

- eau de précipitation ;
- eau du JIRAMA ;
- eau souterraine ;
- eau de la rivière Lokoho.

c) Débit de retour

Le débit de retour est créé pour modéliser l'eau usée venant des sites de demande. Ces eaux usées sont directement acheminées vers la rivière. Cependant, il faut noter que ce n'est pas la totalité de l'eau entrant dans les sites qui est retournée vers la rivière, une part est consommée, et une autre s'infiltré dans le sol ou s'évapore.

III-2-2-3 Création des hypothèses clés

Les hypothèses clés sont des données prêtes à l'emploi. Son avantage est qu'on peut appliquer ces hypothèses à des éléments semblables, par exemple le taux de croissance de la population. Ici, on a créé 4 hypothèses clés :

- les besoins en eau pour l'irrigation, pour refléter le changement des besoins en eau de l'agriculture dans l'avenir qui peuvent augmenter ou diminuer ;
- le taux de croissance de la population, pour tenir compte de l'accroissement de la population dans l'année futur ;
- le taux de croissance du bétail, pour tenir compte de la variation du nombre du bétail qui peut augmenter ou diminuer ;
- le taux de croissance pour le scénario à fort accroissement, pour voir la vulnérabilité des ressources en eau face à un fort accroissement de la population.

a) Réglage de l'hypothèse clé « besoin en eau pour l'irrigation »

L'hypothèse clé « besoin en eau pour l'irrigation » doit être ajustée pour refléter l'évolution de la situation agricole de la Région pour les années à venir. Elle est appliquée à la référence (2001-2050).

On peut supposer que la surface de l'agriculture dans le bassin Lokoho va augmenter étant donné que la Région présente encore beaucoup de surfaces cultivables. Il faut donc estimer les besoins en eau de l'agriculture dans les années à venir.

WEAP possède une fenêtre de saisie des données (figure 17) permettant d'interpoler les données, il suffit de calculer certaines valeurs entre 2001 et 2050 ensuite de les interpoler à l'aide de la fonction « interpolation linéaire » de WEAP.

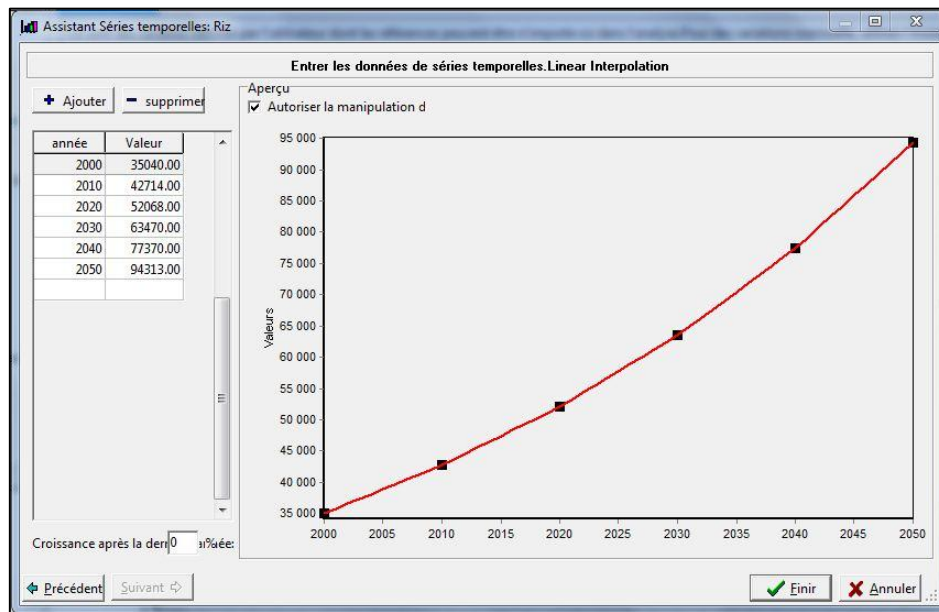


Figure 17 : Fenêtre de saisie des données à interpoler

On peut calculer ces valeurs à l'aide de la formule de projection :

$$B_y = B_x(1 + t)^n$$

Avec B_y : besoin en eau pour l'année y

B_x : besoin en eau pour l'année x (année de base)

t : taux d'accroissement, ici on prend $t = 2\%$

n : nombre d'années comptés à partir de l'année de base, $n = y - x$

Après l'application de la formule avec un pas de 10 ans, les résultats sont présentés dans le tableau 25 ci-dessous.

Tableau 25 : Besoins en eau ($m^3/ha/an$) de chaque type d'agriculture

Année	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Riz	35 040	42 714	52 068	63 470	77 370	94 313
Mais	4 015	4 894	5 966	7 273	8 865	10 806
Haricot	8 395	10 233	12 475	15 206	18 536	22 596
Manioc	15 330	18 687	22 780	27 768	33 849	41 262
Patate douce	12 775	15 573	18 983	23 140	28 208	34 385

Source : Andrianirina et al (2014)

b) Spécification de la croissance de la population

Il s'agit d'assigner à la population (Andapa et Population BV Lokoho) une croissance avec le taux défini par l'hypothèse clé « taux de croissance de la population ». Cette croissance est appliquée dans le scénario de référence.

III-2-2-4 Création des scénarios

a) Scénario de « Référence »

Le scénario de référence est généré une fois que l'utilisateur a ajouté un élément dans l'affichage de « schéma ». Cependant, il faut changer ses données et sa description pour refléter son rôle réel. Dans cette étude, la référence est comptée à partir de l'année 2001 (l'année après le compte actuel) jusqu'en 2050 (fin du scénario).

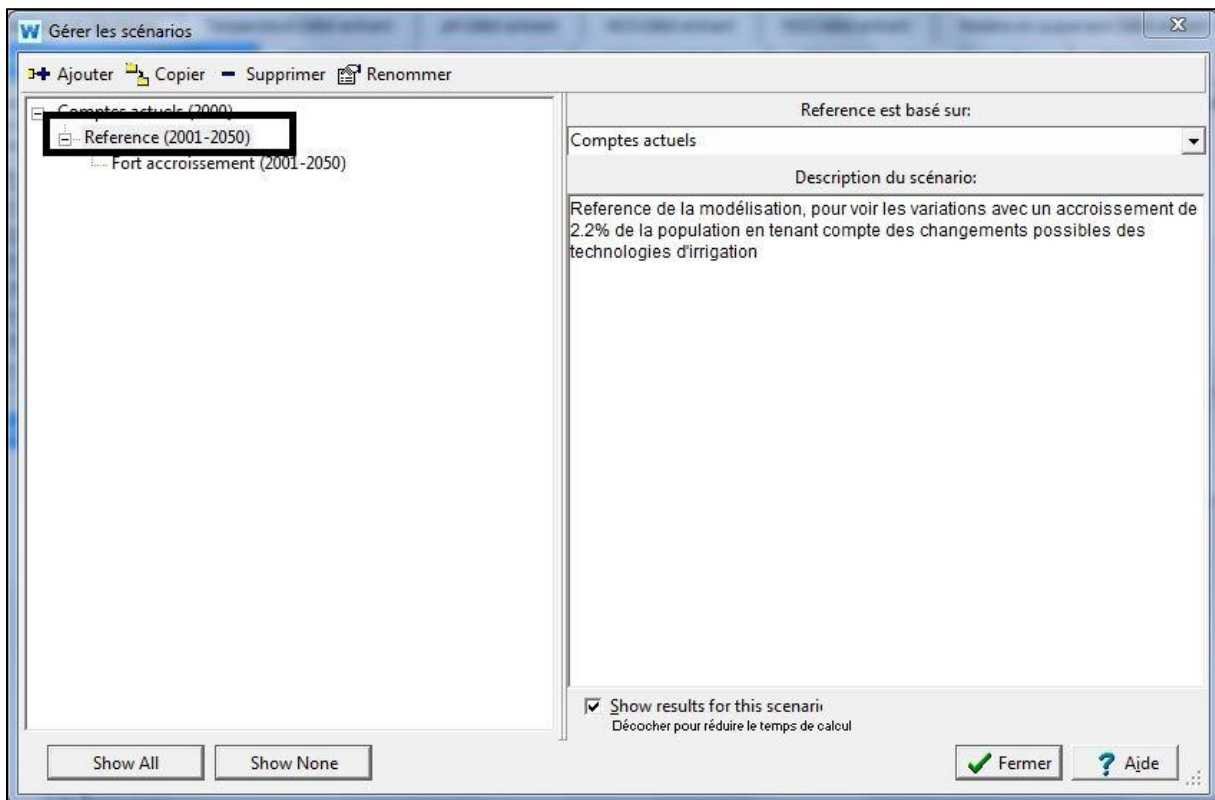


Figure 18 : Fenêtre de gestion des scénarios

b) Scénario « Changement climatique»

La « Méthode de l'Année Hydrologique » est un moyen pour prendre en considération les variations des données hydro-climatiques (les débits de rivière, la pluviométrie et la recharge de la nappe) dans WEAP à travers les analyses des scénarios. Elle consiste à attribuer aux régimes climatiques (très sec, sec, normale, humide, très humide) des valeurs numériques pour que le logiciel puisse les reconnaître (tableau 26). Ceci se fait en allant dans

la vue « donnée », en cliquant sur la branche « Méthode de l'Année Hydrologique », sous la branche des données « Hydrologie ».

Tableau 26 : Définition des types de climats

Types de climats	Valeurs correspondantes
Très sec	0,7
Sec	0,8
Normal	1
Humide	1,3
Très humide	1,45

Source : Tutoriel WEAP21 (SEI)

Il suffit d'entrer ces valeurs dans le champ correspondant dans le tableau « Définitions » (figure 19).

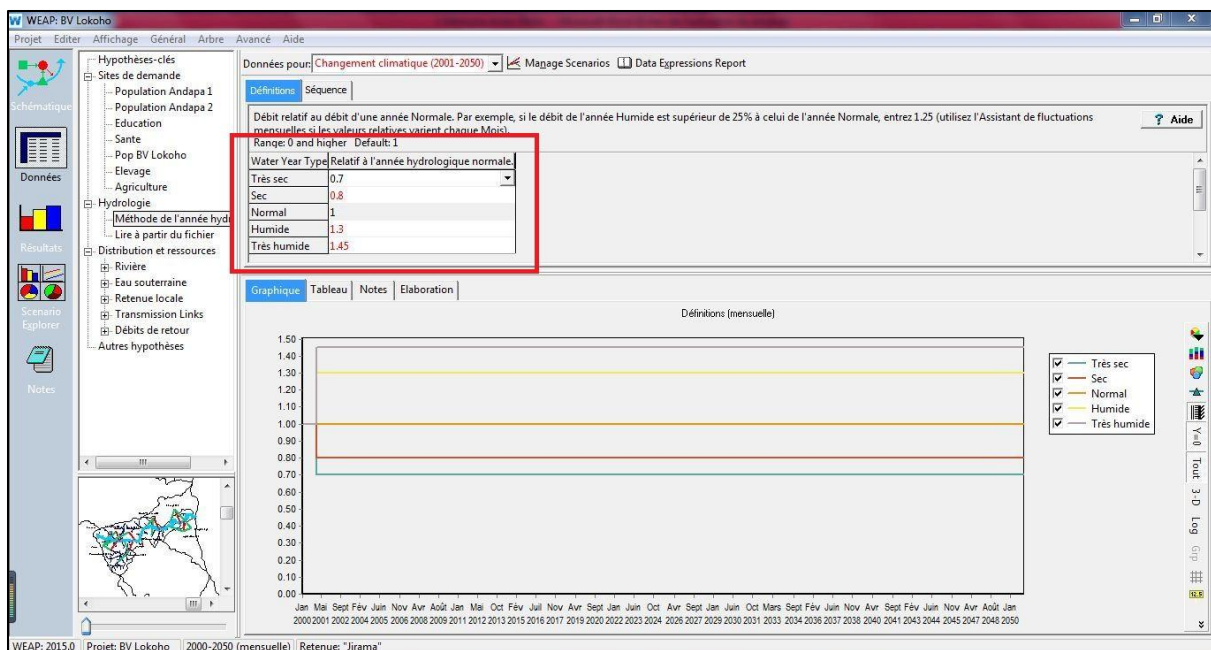


Figure 19 : Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique », définition de type de climat

Il faut aller maintenant dans le tableau « Séquence » pour spécifier l'état du climat de chaque année de l'année de référence (2001-2050) (figure 20).

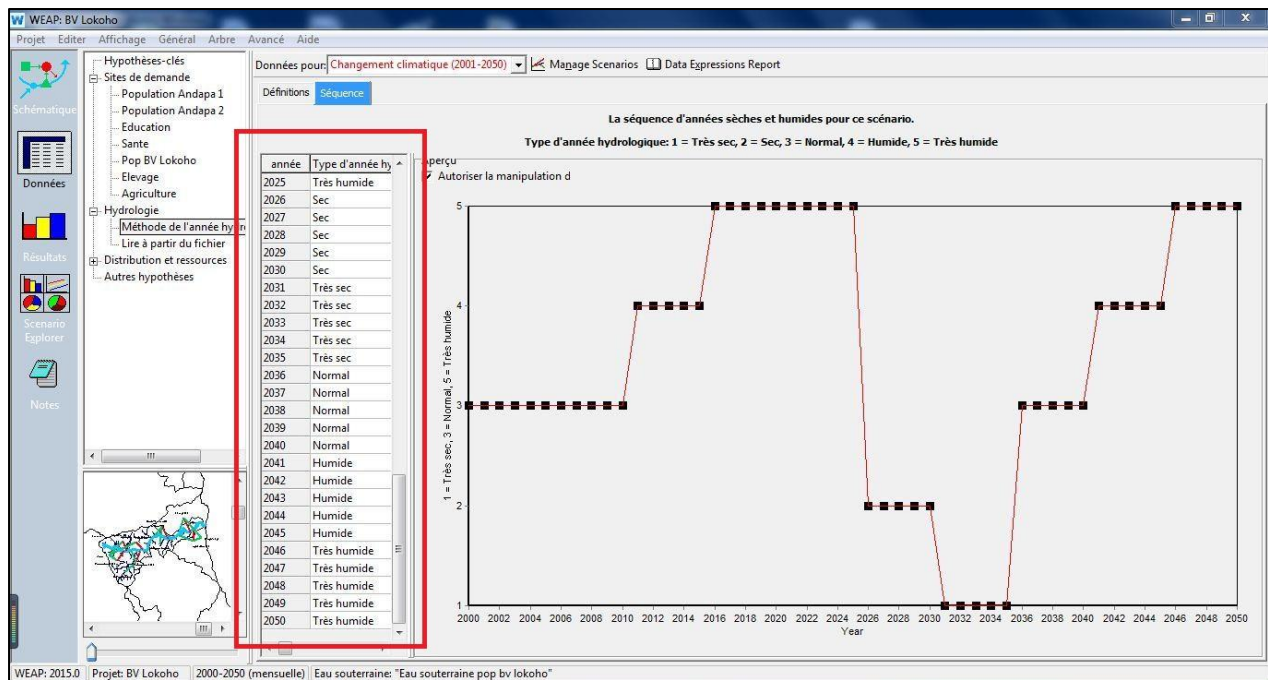


Figure 20 : Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique », spécification de type de climat

Etant donné que le but de cette étude est de proposer une technique de gestion des ressources en eau existantes dans le bassin versant, il faut alors tenir compte les éventuels changements possibles du climat. D'où la création du scénario « Changement climatique », qui est hérité de celui « Référence » mais qui applique la méthode de l'année hydrologique.

c) Scénario « Séquence de climat sec prolongé »

Ce scénario est hérité du scénario « Changement climatique ». Il consiste à utiliser le même scénario mais considérer que les états de chaque année du futur soient tous secs.

d) Scénario « Fort accroissement »

Ce scénario est construit pour voir l'impact d'un fort accroissement de la population sur la demande en eau. Il s'agit d'affecter à la population un taux d'accroissement de 5% au lieu de 2,2%. On en a créé 2, l'un hérité du scénario « Référence » et l'autre celui du « Changement climatique ».

La structure finale des scénarios construits est résumée dans la figure 21 ci-après.

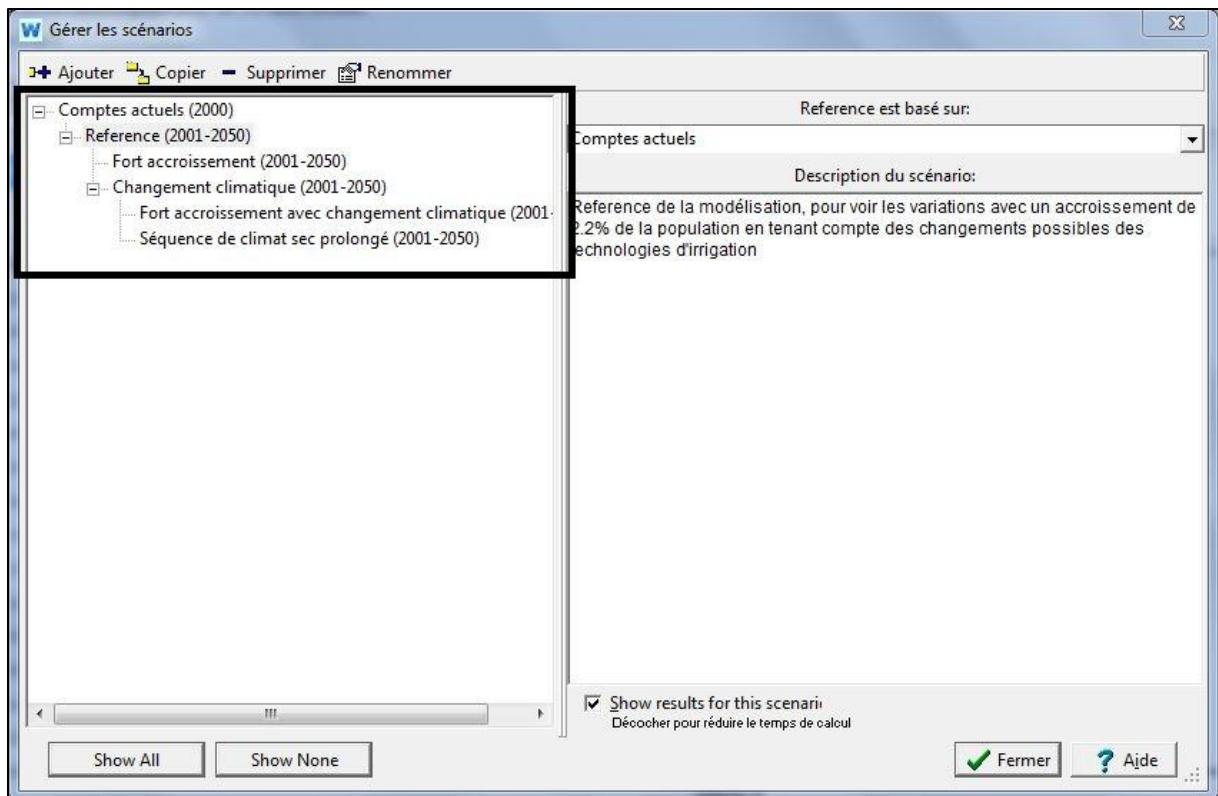


Figure 21 : Fenêtre montrant les différents scénarios construits

III-2-2-5 Modélisation de l'eau souterraine

Trois sources en eaux souterraines sont créées, une pour la « population Lokoho », une pour la « population Andapa 1 » et une autre pour « l'agriculture et l'élevage ». Ceci se fait dans l'affichage schématique.

III-2-2-6 Création d'un ensemble de polluants et modélisation de la qualité

Pour la modélisation de la qualité de l'eau, il faut créer l'ensemble de polluants à rendre compte en allant dans le menu « Général » puis dans les « Eléments de la qualité de l'eau ». Il faut spécifier les unités de chaque élément ainsi que le mode de calcul. Ici, on a choisi la méthode « conservatif » comme méthode de calcul pour tous les éléments (figure 22).

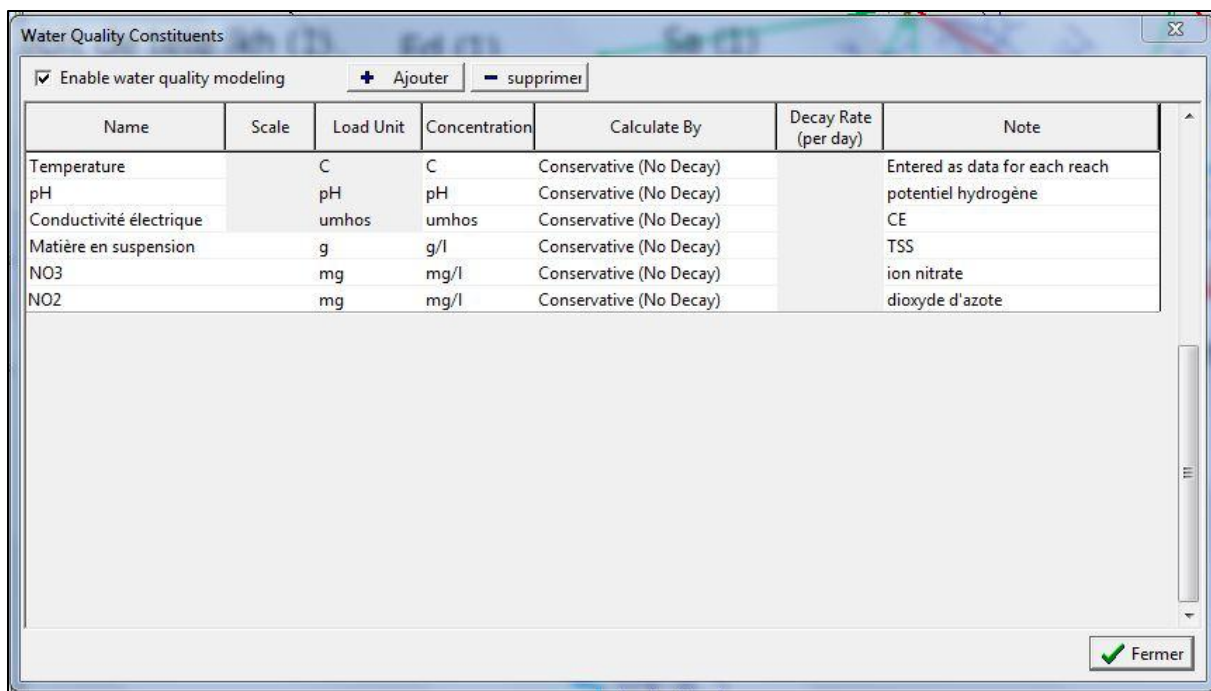


Figure 22 : Fenêtre de saisie des éléments à modéliser

III-2-2-7 Saisie des données

a) Les éléments d’affichage cartographique

Dans WEAP, Il y a 2 possibilités d’entrer les données :

- dans la vue « donnée », chercher l’élément dans l’arborescence des données, cliquer sur l’élément qu’on veut entrer les données, et saisir les données dans les champs à droite ;
- dans la vue « schématique », clic droite sur l’élément qu’on veut entrer les données, on est arrivé directement dans la vue donnée de l’élément, il ne reste plus qu’à saisir les données.

b) La captation

La captation fait partie de la branche étude hydrologique. Elle sert à modéliser le bassin versant en tenant compte de la surface du bassin, la précipitation, l’évapotranspiration, etc. Dès sa création sur la carte, une boîte de dialogue s’ouvre pour choisir une certaine option. Le logiciel demande si le bassin contient des surfaces irriguées et si oui, il faut spécifier la priorité de demande. L’information générale sur le bassin versant est présentée par la figure 23 ci-après.

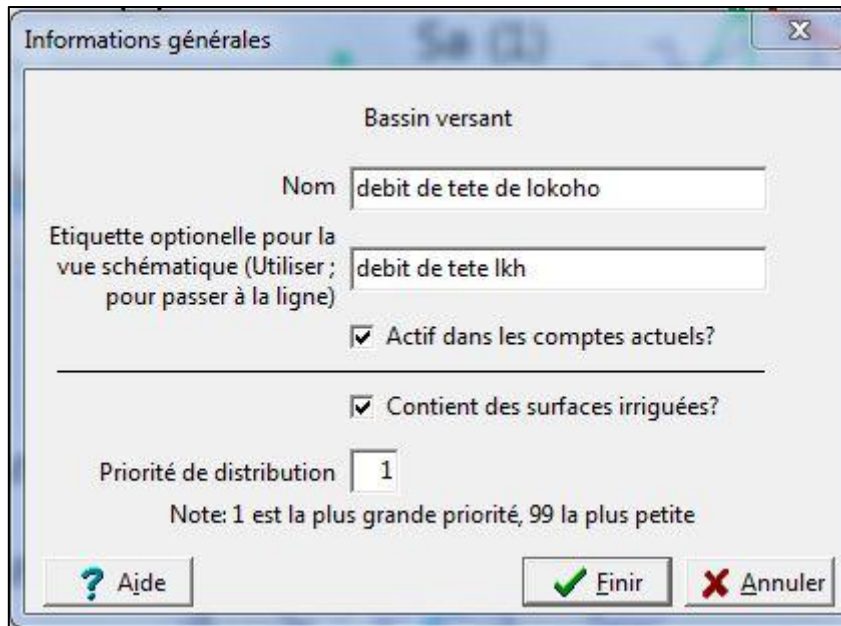


Figure 23 : Fenêtre des informations générales sur le bassin versant

Les données nécessaires de la captation sont :

- l'occupation de sol : Surface, Kc, Précipitation effective ;
- le climat : P, ETRéf ;
- l'irrigation : irrigué ;
- la qualité de l'eau.

On a choisi la méthode FAO ou Précipitation et Infiltration comme méthode de calcul.

c) **Réservoir JIRAMA**

Pour les retenues locales ou réservoirs (JIRAMA), les données entrées sont les données concernant le débit entrant, la capacité de stockage, l'évaporation nette des réservoirs de la Lokoho et d'Andapa.

d) **Les eaux souterraines**

Concernant les eaux souterraines, à part les données comme le débit, la capacité de stockage, etc. (tableau 18 ; 20). On peut aussi ajouter les données sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau tels que le pH, la température, la minéralisation, etc.

La figure 24 ci-après montre la qualité de l'eau souterraine.

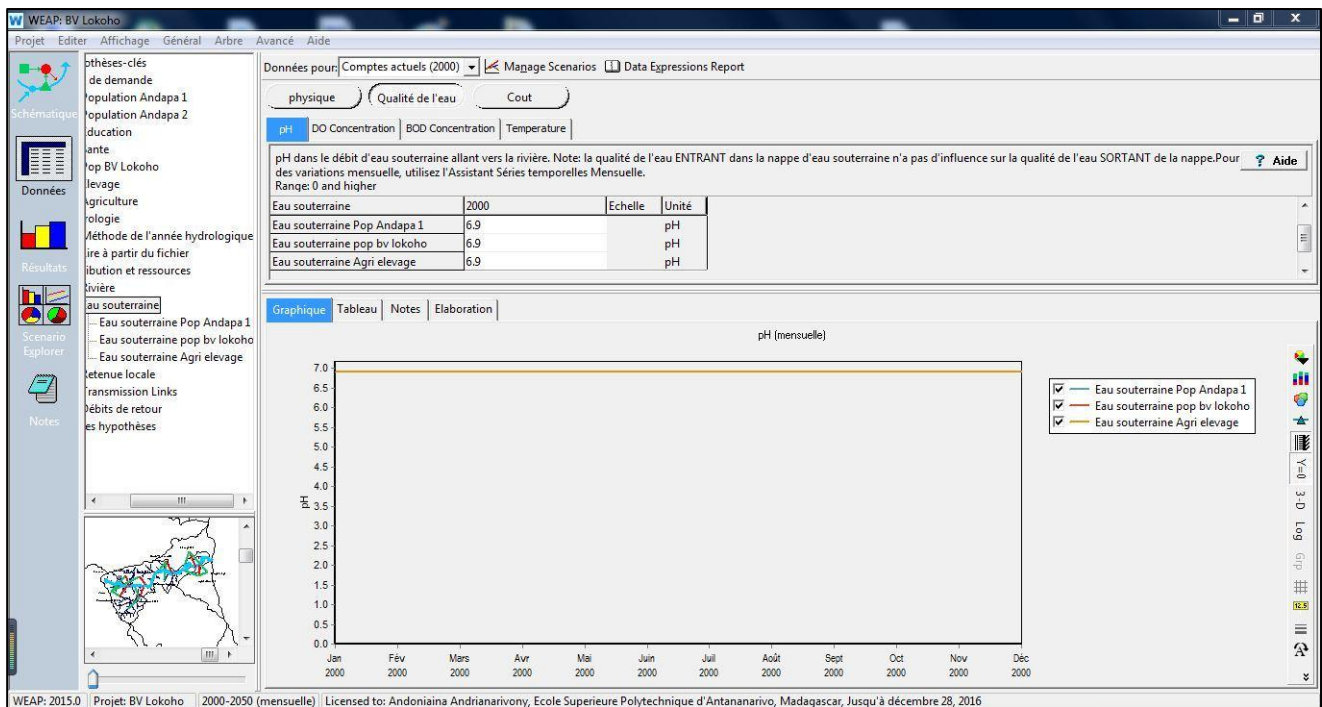


Figure 24 : Fenêtre « pH » des eaux souterraines

Après avoir saisi les données, on clique sur « résultat » pour le calcul des résultats.

Ainsi, les résultats et les interprétations des différents scénarios nous permettent de mieux connaître le degré de la vulnérabilité des ressources en eau du bassin afin de proposer quelques suggestions pour leur gestion de façon rationnelle et intégrée.

QUATRIEME CHAPITRE :
PRESENTATION DES
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

Après la saisie des données, on passe maintenant à la présentation des résultats. Il faut aller dans l'affichage « Résultats » et le logiciel fait le calcul automatiquement. La rapidité du calcul est en fonction du nombre des éléments à calculer, donc en fonction du nombre d'éléments introduits.

Le résultat peut être présenté sous 3 formes: graphe, tableau, ou carte.

L'analyse de ces résultats permet de voir l'évolution des ressources en eau existantes dans le site, et d'en proposer des solutions pour gérer ces ressources afin d'atténuer les impacts des différents changements qui peuvent survenir.

IV-1 PRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DU MODELE

Le modèle cartographique du bassin versant de Lokoho créé avec WEAP est présenté par la figure 25 ci-dessous.

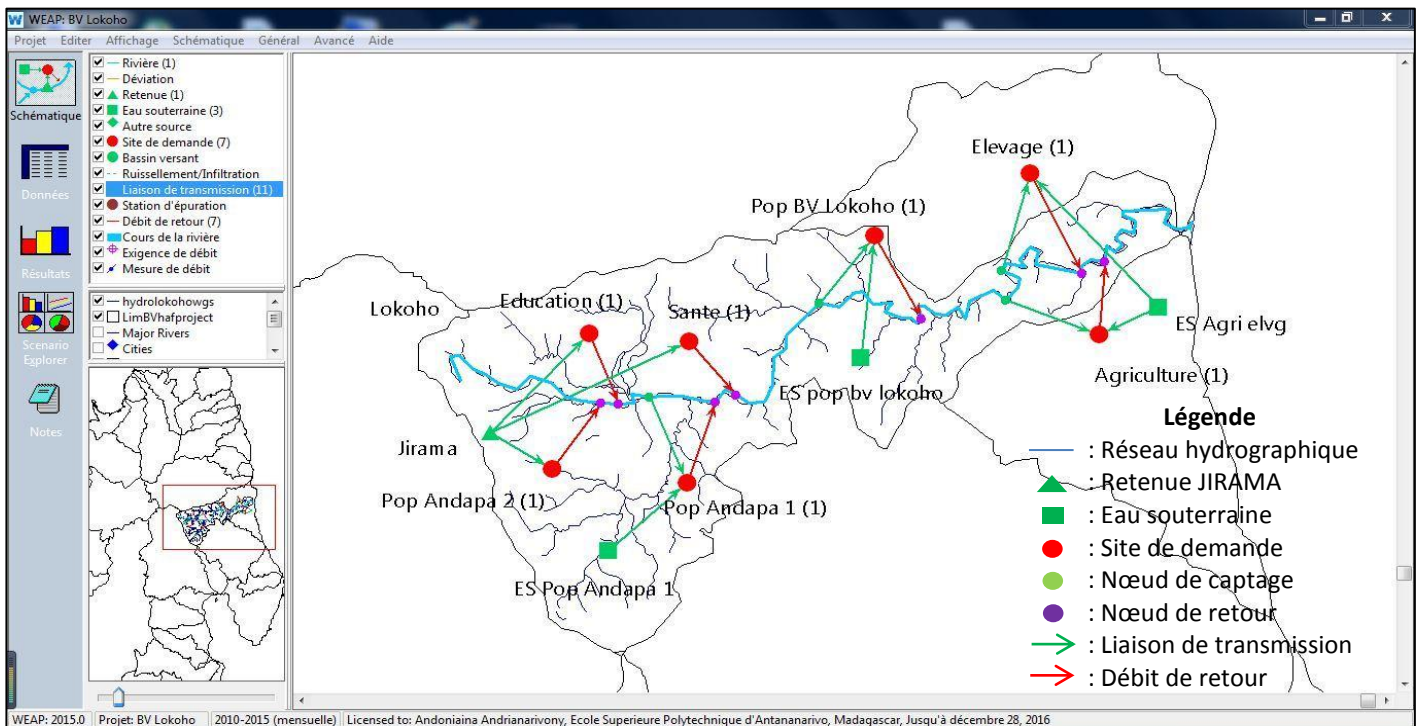


Figure 25 : Bassin versant de Lokoho avec les éléments de la modélisation par WEAP

IV-2 CLIMATS

IV-2-1 Précipitations dans le bassin versant

D'après cette figure ci-après, on remarque bien les 2 saisons : la saison chaude qui va d'Octobre en Avril, caractérisée par des températures élevées est une forte pluviosité et la saison fraîche qui va de Mai en Septembre, marquée par la persistance des pluies fines

(crachins) donc de faible quantité. Les plus fortes précipitations se trouvent en mois de Janvier avec une valeur de 71,5 Mm³.

Le modèle des précipitations est présenté par la figure 26 ci-dessous.

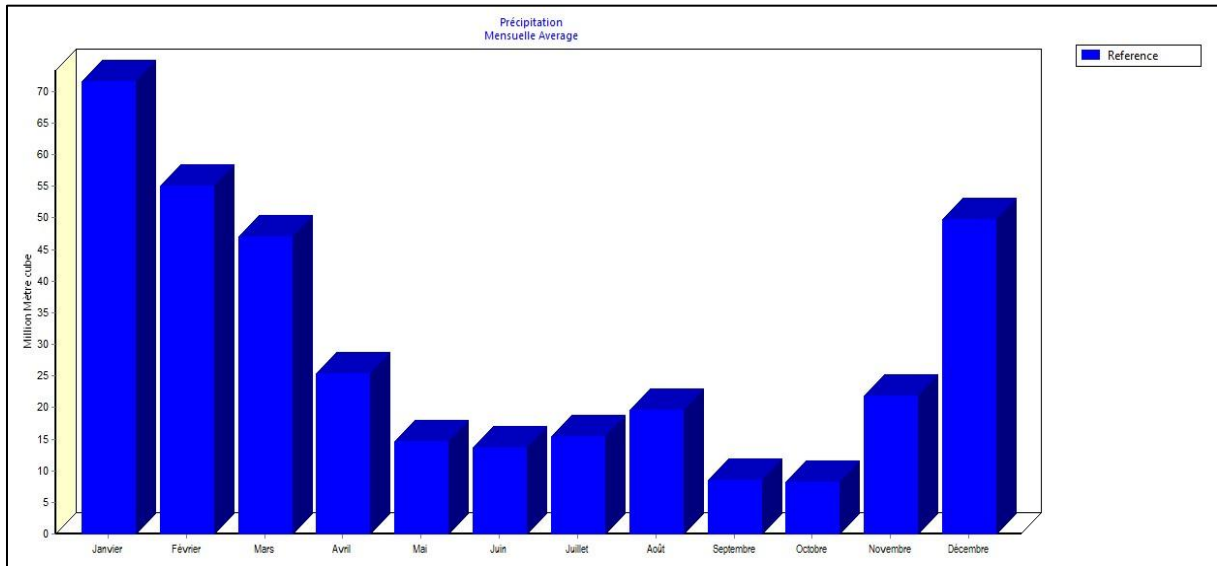


Figure 26 : Précipitations mensuelles dans le BV Lokoho

IV-2-2 Ruissellement d'eau de pluie dans le bassin versant

Le modèle de ruissellement est présenté par la figure 27 ci-après.

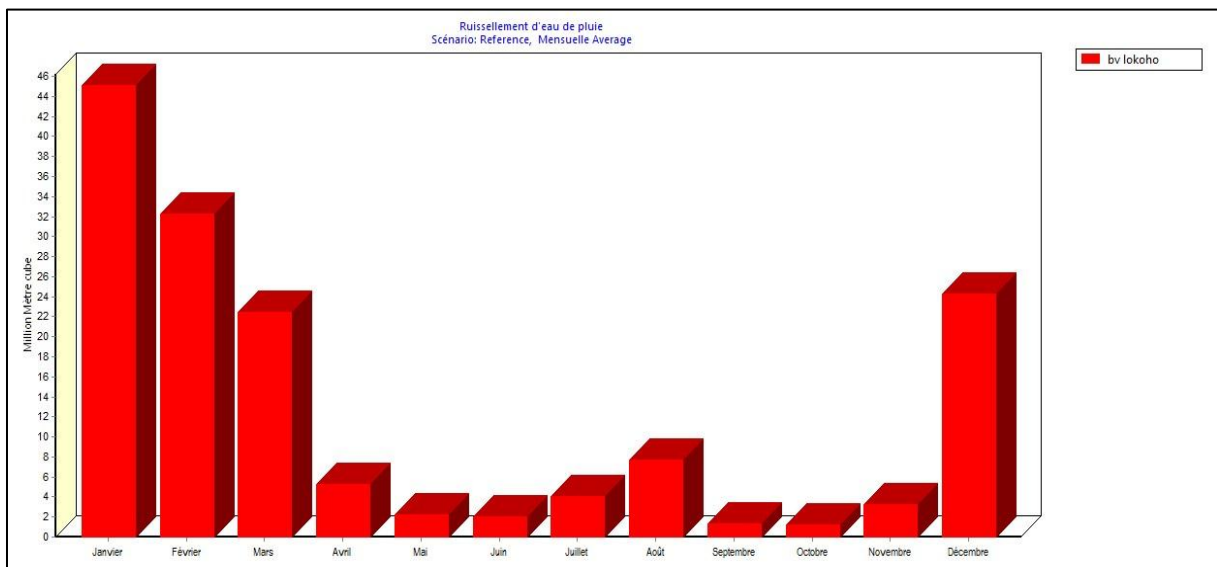


Figure 27 : Ruissellement d'eau de pluie par mois

Ce graphe nous démontre que la quantité d'eau de pluie ruisselée est fonction des précipitations tombées. Le régime hydrologique de la Lokoho dépend donc du régime pluviométrique. Comme dans le cas des précipitations, c'est au mois de Janvier, où l'on

trouve la plus grande quantité de pluie tombée qu'on a le taux de ruissèlement maximal. On constate aussi une baisse importante à partir du mois d'Avril jusqu'au mois de Novembre, ce qui est normal puisque c'est la période d'été.

IV-2-3 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est l'ensemble de l'évaporation et de la transpiration. L'évaporation est la transformation de l'eau en vapeur en niveau des plans d'eau libre et du sol, alors que la transpiration se fait au niveau des végétaux.

IV-2-3-1 Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est l'évapotranspiration qui tient compte seulement des conditions climatiques.

Après la modélisation par WEAP dans le BV Lokoho, on obtient le graphe suivant pour l'ETP (figure 28).

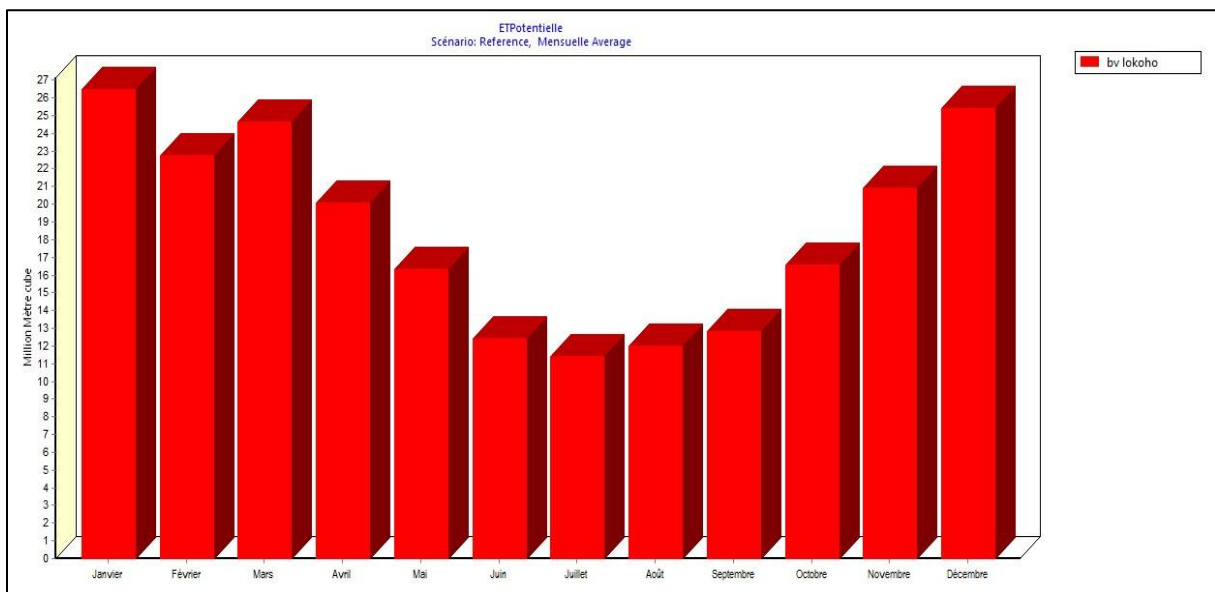


Figure 28 : Evapotranspiration potentielle

IV-2-3-2 Différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle (ETP-ETR)

L'évapotranspiration réelle est l'évapotranspiration qui tient compte des conditions climatiques, de la couverture végétale et de l'espace considéré.

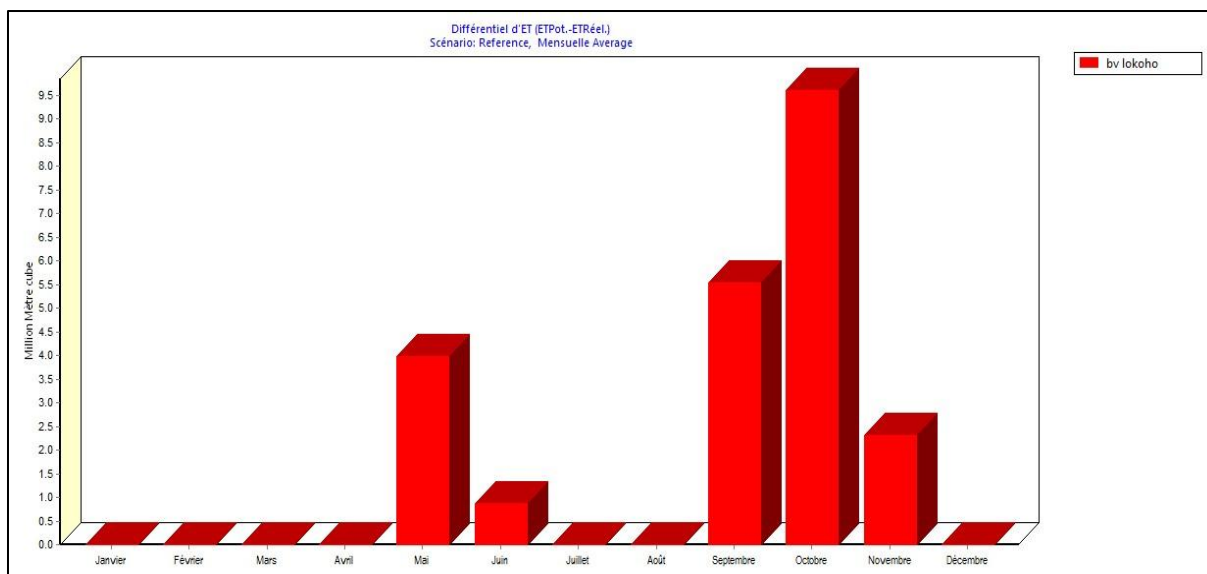


Figure 29 : Différence entre l'ETP et l'ETR

Le graphe montre qu'à partir du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril, la différence est nulle, donc $ETP = ETR$. Il en est de même pour les mois de Juillet et Août. Ces périodes correspondent à la saison chaude et pluvieuse. Pour le reste, il y a une différence, qui peut atteindre jusqu'à $9,61 \text{ Mm}^3$ pour le mois d'Octobre. Les mois de Mai et Juin correspondent à la période fraîche avec des crachins (figure 26). Du mois de Septembre au mois de Novembre, la période correspond à la période d'été. Ainsi, cette différence permet d'identifier la saison chaude et humide avec celle fraîche et sèche.

IV-3 DISTRIBUTIONS ET RESSOURCES

IV-3-1 Débits entrant vers les eaux souterraines (recharge)

La recharge ou réalimentation des nappes est liée aux variations des précipitations (figure 26).

Le débit entrant dans les nappes aquifères est encore semblable à celle des précipitations car l'alimentation des eaux souterraines est assurée en grande partie par l'infiltration des précipitations efficaces. Comme l'indique le graphe des précipitations, le débit atteint son pic au mois de Janvier avec un débit de $14,38 \text{ Mm}^3$. Cependant, le débit faible à partir du mois d'Avril jusqu'au mois de Novembre correspond à la période sèche. Le débit nul du mois de Septembre jusqu'en Novembre est dû à la forte évaporation et à la faible précipitation, qui entraîne une différence négative entre les précipitations et l'évaporation (tableau 22) ($E > P$). La totalité de pluie tombée est alors évaporée et/ou ruisselée.

La figure 30 ci-dessous montre la variation des débits entrant vers les réservoirs souterrains.

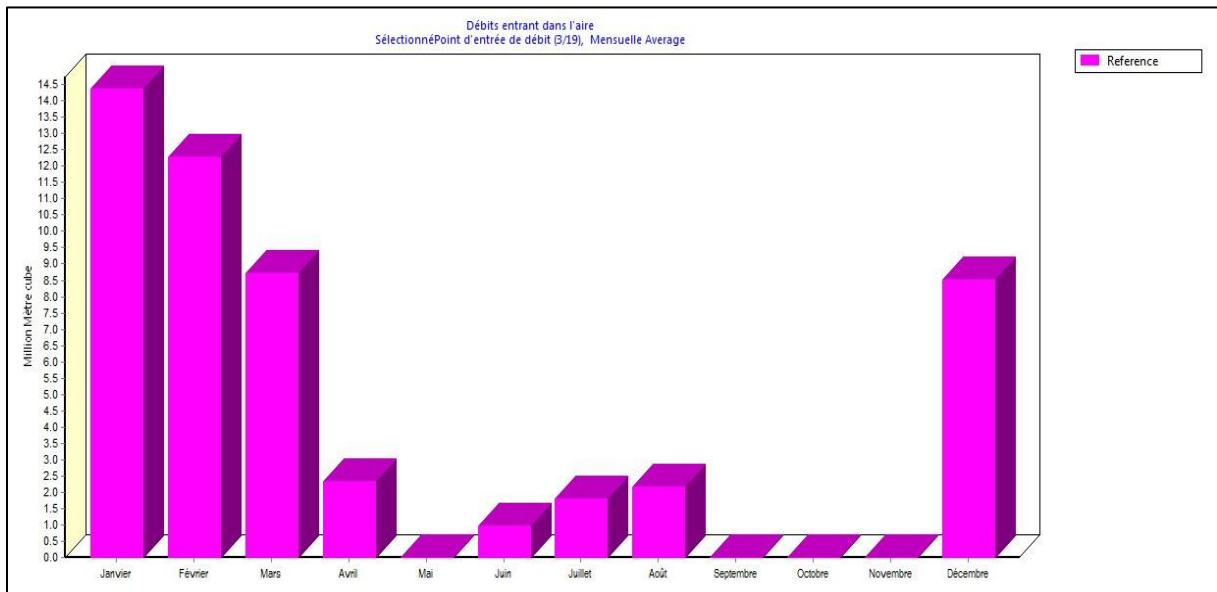


Figure 30 : Débits entrant vers les nappes souterraines

IV-3-2 Débits sortant des sites de demande

La figure 31 ci-après présente le débit sortant de la population (Lokoho, Andapa 1 et Andapa 2).

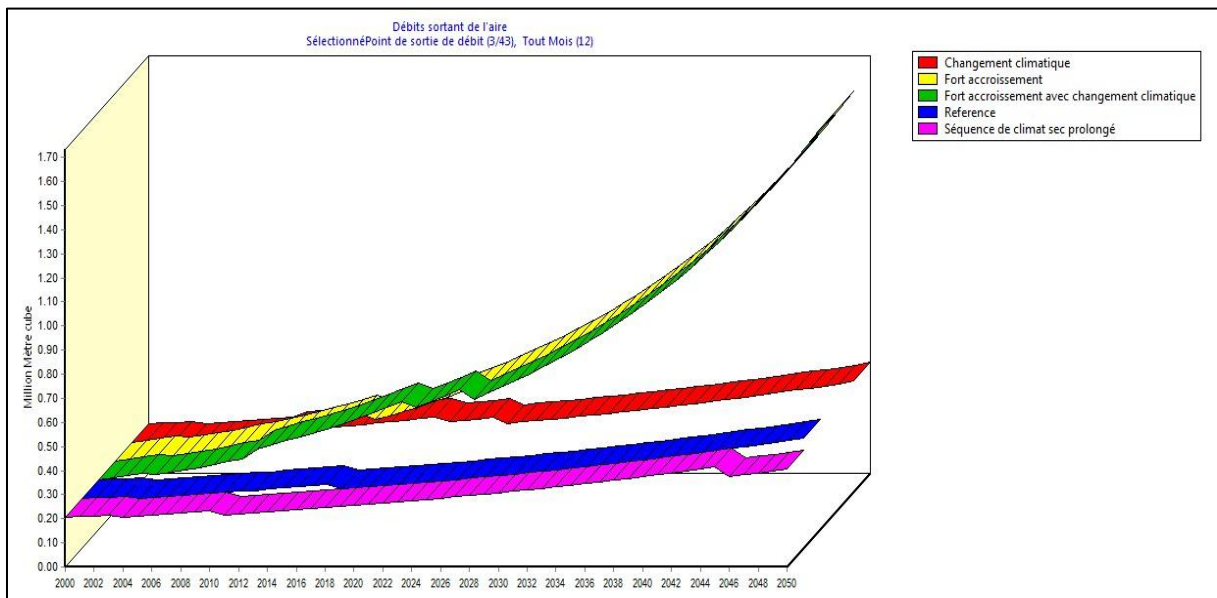


Figure 31 : Débits sortant des sites de demande (Pop. Andapa 1, Andapa 2, Lokoho)

D'après le graphe ci-dessus, pour l'ensemble des 3 sites de demande, c'est-à-dire la population : Andapa 1, Andapa 2 et Lokoho, le débit sortant croît dans les années à venir,

surtout pour les scénarios à « fort accroissement ». Ceci est dû au fait de la croissance de la population. WEAP prévoit qu'une lame d'eau de $1,66.10^6 \text{ m}^3$ sortira des sites en 2050 pour le scénario « fort accroissement » (croissance de 5% de la population). Le changement climatique est marqué par la différence entre les scénarios « référence » et « changement climatique ».

IV-3-3 Débits de rivière

Le graphe ci-dessous montre que les 3 courbes commencent à se différencier à partir de l'année 2011, ce qui est évident à cause du changement climatique de l'année futur. Pour le scénario « séquence de climat sec prolongé », le débit décroît avec l'année. Pour le scénario « référence », le débit est constant car ce scénario est fondé sur l'hypothèse que le climat est normal dans les années futures. Pour le scénario « changement climatique », la lame d'eau qui s'écoulera en 2050 peut atteindre jusqu'à $2,48.10^9 \text{ m}^3$, car on a supposé que cette année sera humide. Les ressources en eau sont donc très vulnérables au changement climatique, la situation est ainsi alarmante.

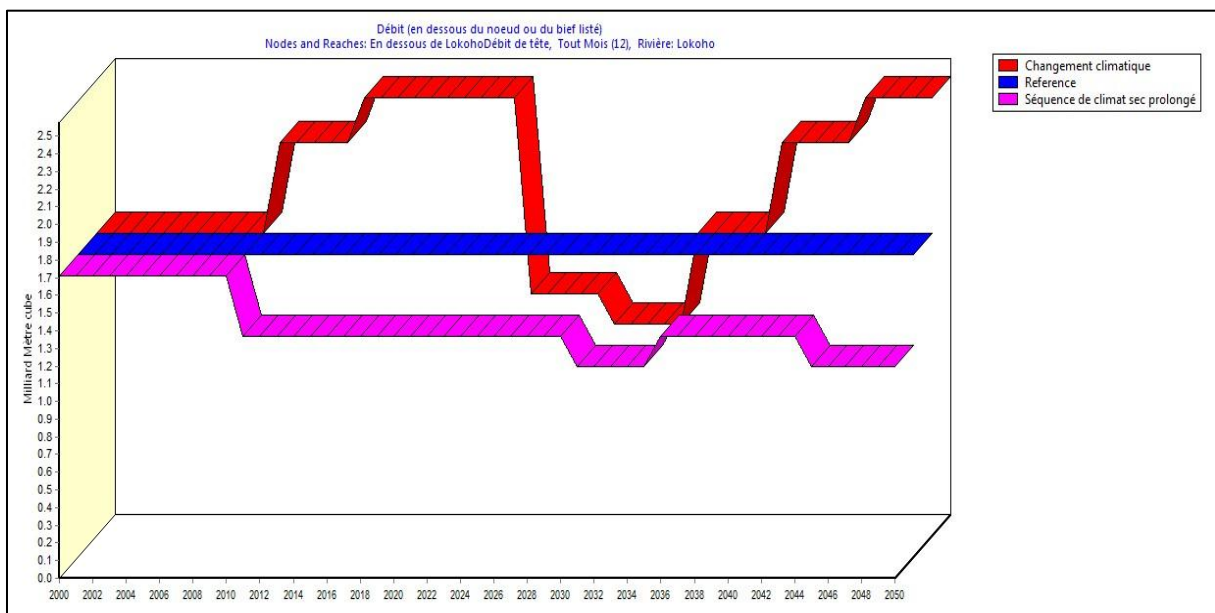


Figure 32 : Débits annuels en amont de la rivière Lokoho

IV-3-4 Stockage d'eau souterraine

On remarque que le stockage d'eau souterraine de l'Agriculture est largement inférieur par rapport aux deux autres. Ceci est dû au fait que l'Agriculture consomme plus d'eau que la population donc sa nappe est surexploitée (figure 33).

L'évolution du stockage des eaux souterraines est présente dans la figure 33 ci-après.

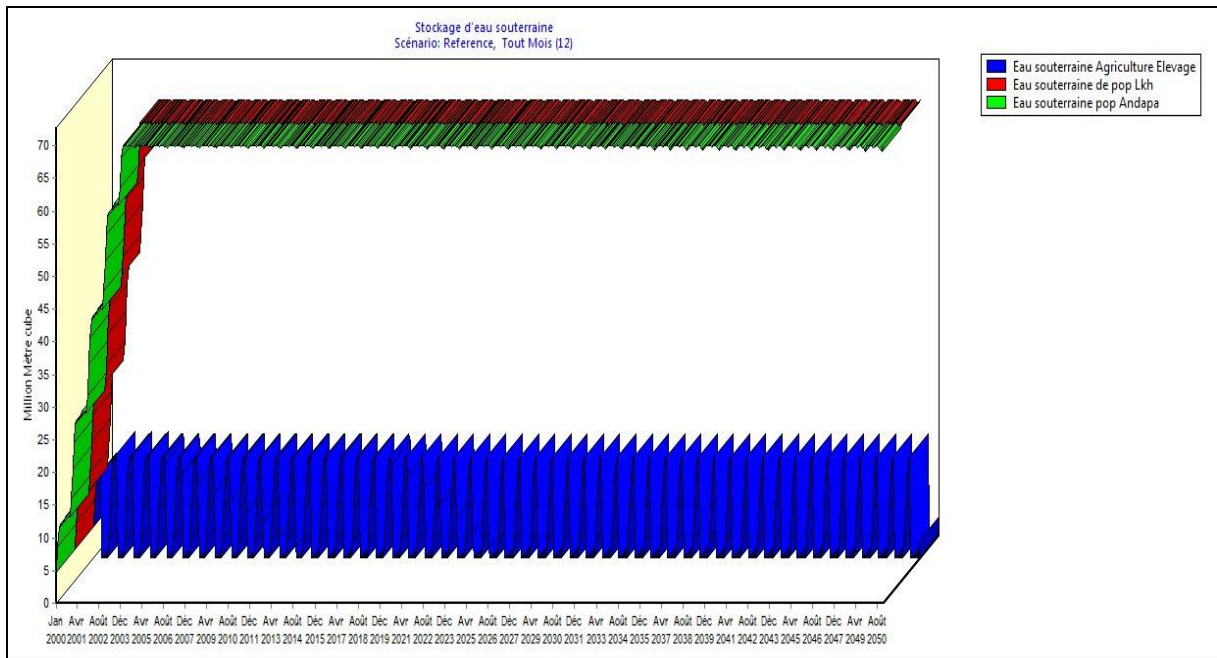


Figure 33 : Evolution du stockage des eaux souterraine

L'évolution des capacités des stockages des eaux souterraines varie selon la saison et l'exploitation, ce qui explique l'allure des graphes en forme de dent de scie.

IV-4 DEMANDE ET BESOINS EN EAU

IV-4-1 Besoins en eau des sites de demande

La demande en eau dans les années à venir pour l'ensemble des sites de demande est présentée dans la figure 34 ci-après.

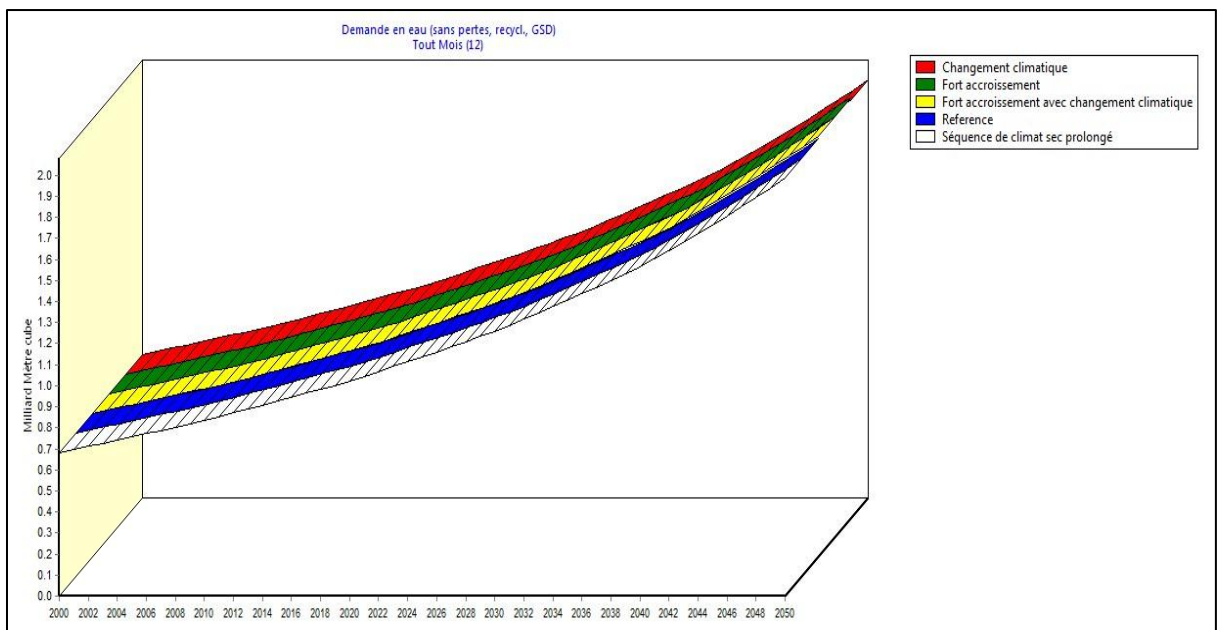


Figure 34 : Demande en eau pour l'ensemble des sites de demande avec les scenarios

D'après le graphe (figure 34), la demande en eau augmentera dans les années à venir pour chaque scénario. Les courbes ont la même allure, il n'y a pas de différence entre les demandes pour les différents scénarios. Pour l'ensemble du bassin, la demande en 2050 peut aller jusqu'à 12,64 Mm³ pour les scénarios à « fort accroissement » et 3,27 Mm³ pour les autres scénarios.

Mais si on prend un seul site de demande (population), on remarque une grande différence entre la demande du scénario « référence » et le scénario « fort accroissement ». La demande pour le scénario « fort accroissement » croît plus vite que celle du « référence ». Ce qui est évident parce que, plus la population est grande, plus les besoins en eau de la Région seront plus importants pour les années à venir (figure 35).

La figure 35 ci-dessous montre la demande en eau de la population Andapa 1.

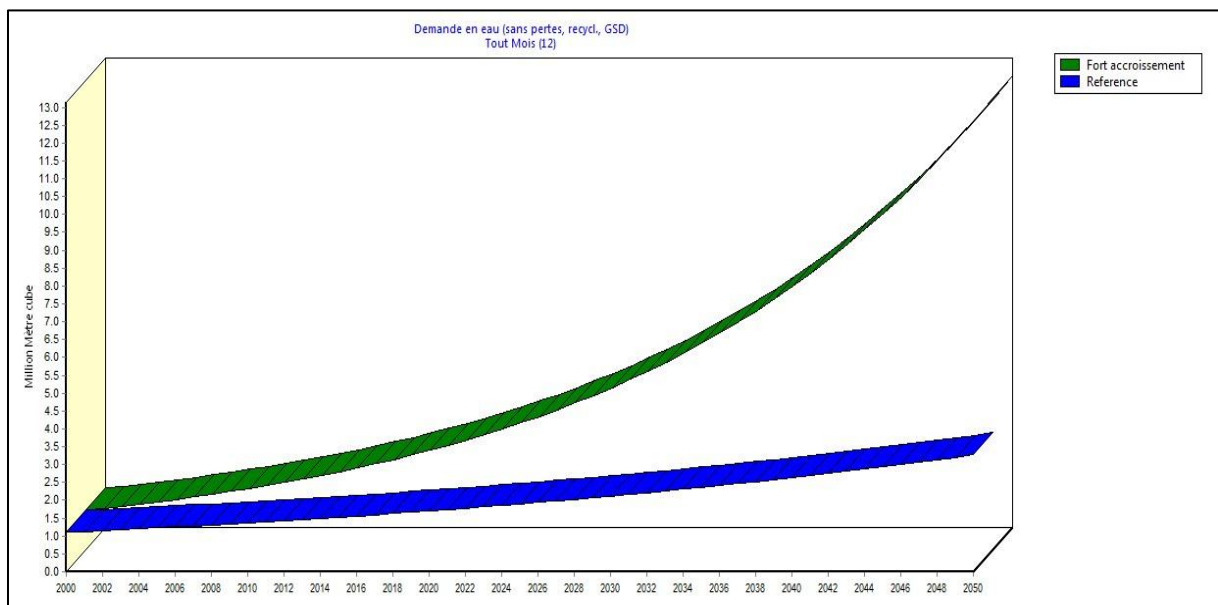


Figure 35 : Demande en eau pour la population Andapa 1

Les besoins en eau vont donc augmenter dans les années qui viennent, alors que les ressources en eau vont diminuer. Ce qui appuie notre hypothèse de la nécessité d'une gestion efficace et productive des ressources en eau dès à présent afin d'être mieux préparé et ainsi mieux assurer l'avenir.

IV-4-2 Eau distribuée

La variation d'eau distribuée dans le bassin versant est présentée par la figure 36 ci-après.

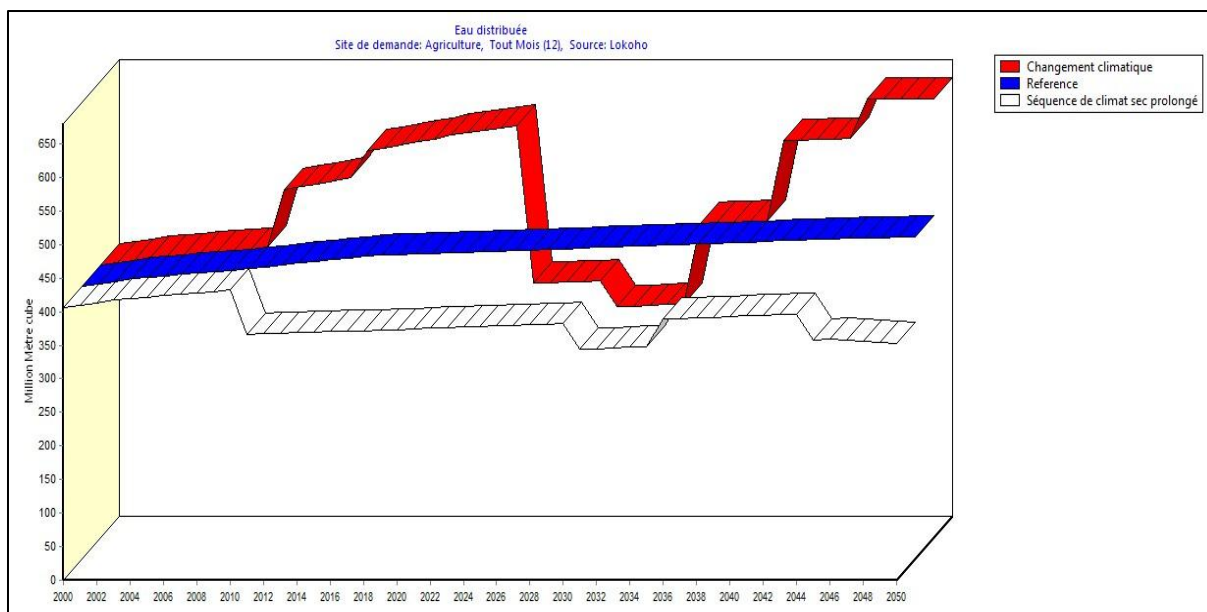


Figure 36 : Eau distribuée par le fleuve Lokoho en fonction du type de climat

Le graphe obtenu est semblable à celui du débit de la rivière Lokoho car l'eau distribuée est fonction du débit donc de la quantité. Pour le scénario « référence », l'eau distribuée est quasiment constante pendant toutes les années de modélisation. Par contre, le graphe du scénario « changement climatique » varie en fonction du type de climat, il en est de même pour le scénario « séquence de climat sec prolongé ». Pour le scénario « changement climatique », la distribution passe de 612,9 Mm³ à 378,98 Mm³ entre 2025 et 2026, puisque l'année 2025 sera « très humide » alors que l'année 2026 sera « sèche ».

L'eau distribuée par toutes les sources existantes est présentée par la figure 37 ci-après.

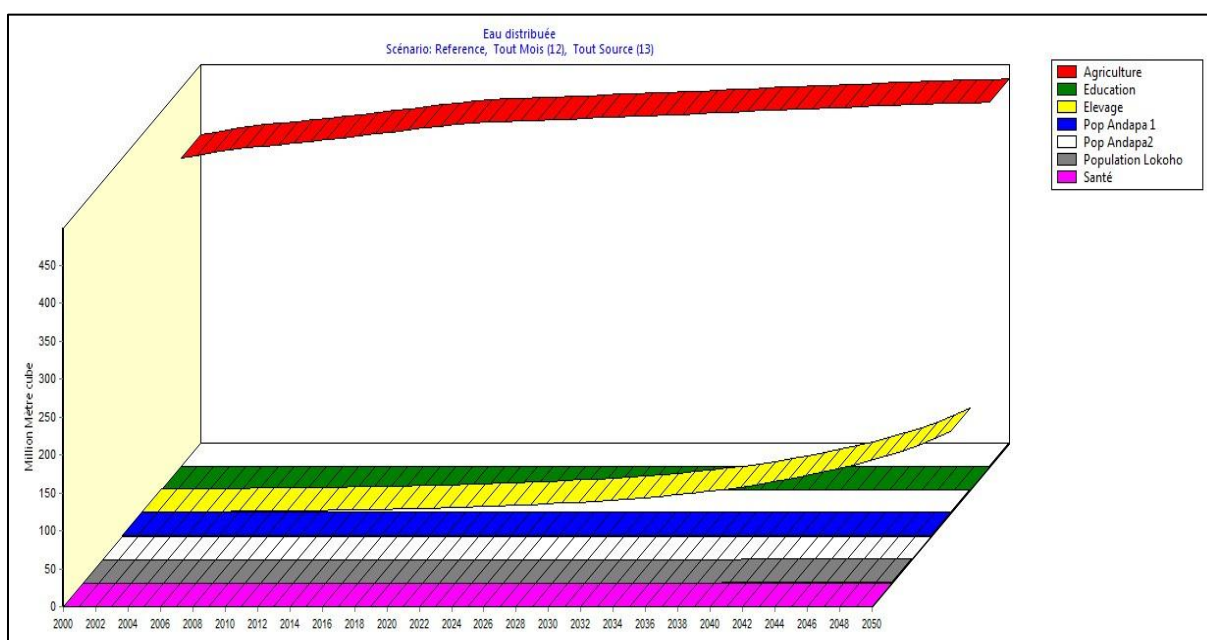


Figure 37 : Eau distribuée pour tous les sites de demande, scénario « référence », toute

Le graphe montre une fois de plus que l'agriculture est le plus grand consommateur d'eau dans le bassin versant, le secteur élevage occupe aussi une place importante, avec une demande qui augmente avec l'année. Les estimations théoriques effectuées sont confirmées par la pratique (tableau 16). Pour les autres secteurs, on constate que les eaux distribuées sont similaires.

IV-4-3 Demande non satisfaite

La demande non satisfaite de chaque site de demande est présentée par la figure 38 ci-dessous.

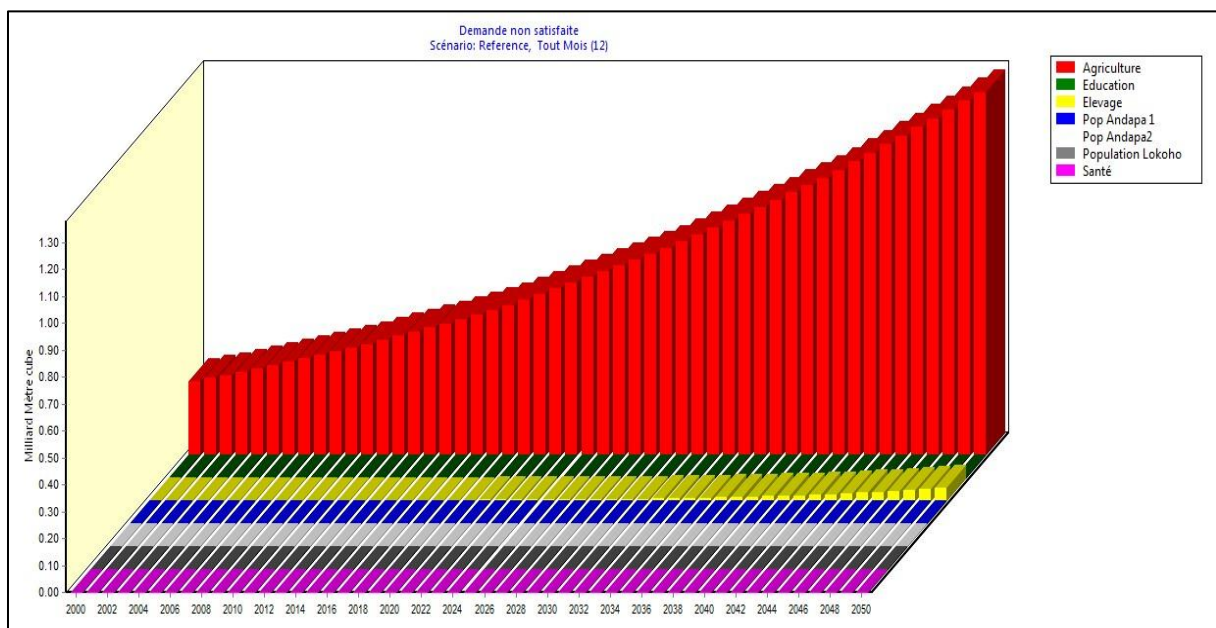


Figure 38 : Demande non satisfaite des sites de demande, scénario : « Référence »

Etant donné que l'agriculture est le plus grand consommateur en eau, il est donc le plus sujet aux problèmes de manque d'eau, qui croît avec les années. On remarque même une grande différence significative par rapport aux autres sites auxquels la demande non satisfaite est sensiblement nulle durant toutes les années à venir, alors que pour l'élevage, les contraintes commenceraient sérieusement en 2029, à raison de 0,01 Milliard m³. En 2050, la demande non satisfaite de l'agriculture du bassin versant est de 1,35 Milliard m³ dont celle de l'élevage allant jusqu'à 0,05 Milliard m³ (figure 38).

La demande non satisfaite de la population Andapa 1 est présentée par la figure 39 ci-dessous.

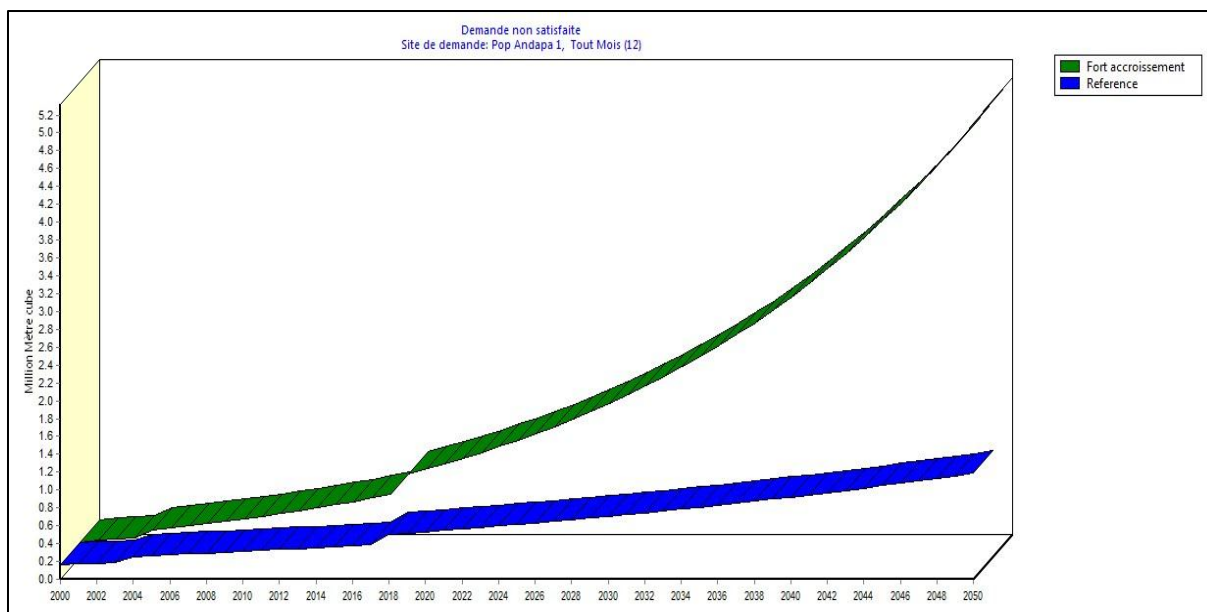


Figure 39 : Demande non satisfaite annuelle de la population Andapa 1

On remarque bien la grande différence entre les 2 scénarios. La demande non satisfaite avec le scénario « fort accroissement » croît d’une manière exponentielle, tandis que celle du scénario « référence » croît d’une manière assez constante et beaucoup moins significative. En 2050, la demande non satisfaite de la population Andapa 1 est de 1,19 Mm³ pour le scénario « référence » alors que pour le scénario « fort accroissement » celle-ci peut arriver jusqu’à 5,12 Mm³, soit jusqu’à 4 fois plus grande (figure 39).

IV-4-4 Recouvrement des besoins en eau

La figure 40 ci-après montre le pourcentage de recouvrement des besoins en eau pour chaque site de demande avec le scénario « référence ».

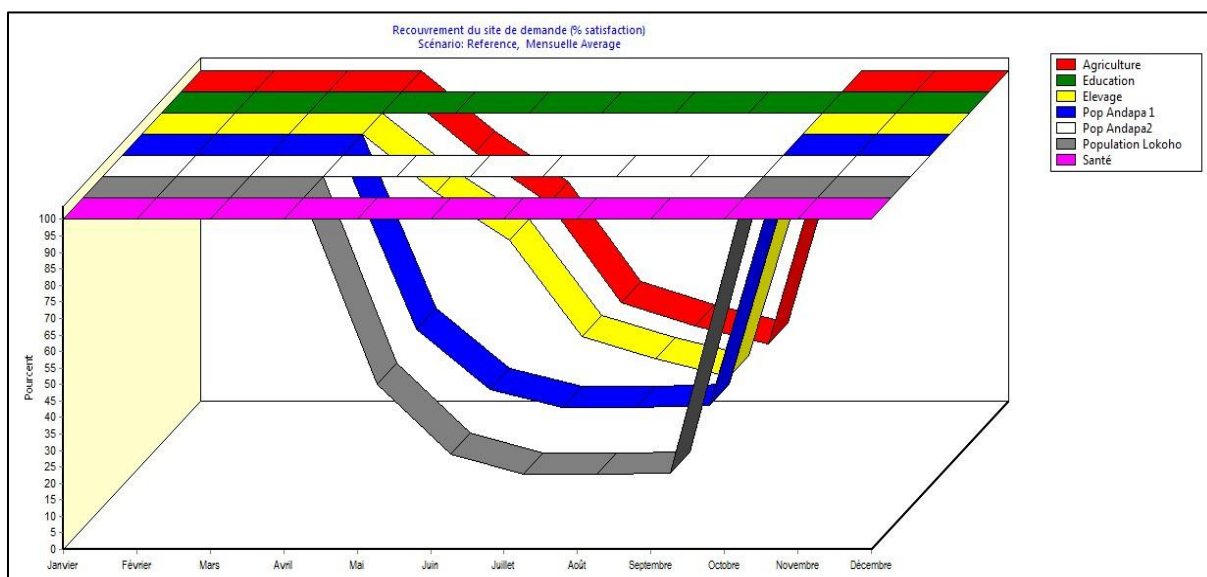


Figure 40 : Recouvrement des besoins en eau mensuel des sites de demande, scénario : « référence »

Le recouvrement désigne le pourcentage de satisfaction. A partir du mois de Mai jusqu'au mois de Octobre, on observe des insatisfactions au niveau de certains sites de demande utilisant la rivière Lokoho comme source. Ceci s'explique par le fait que cette période correspond à la période sèche. Durant la saison humide, les besoins sont satisfaits à 100% (figure 40).

IV-4-5 Débits des sites de demande

Le débit annuel des sites de demande est présenté dans la figure 41 ci-dessous.

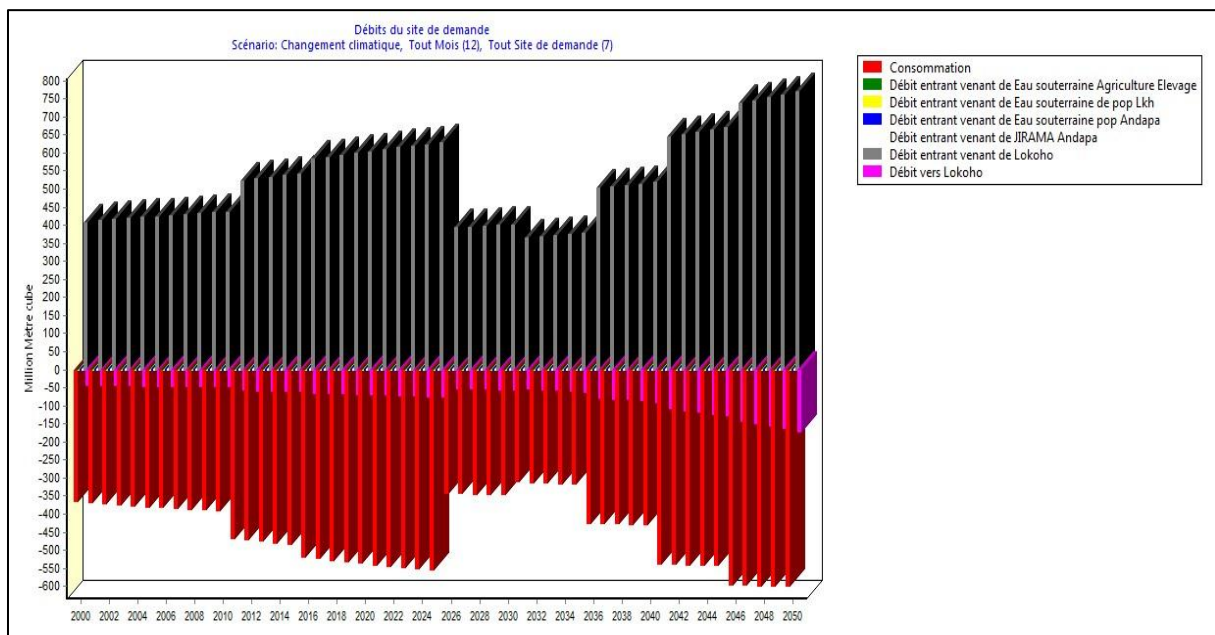


Figure 41 : Débits annuels des sites de demande, scénario « changement climatique »

Le graphe (figure 41) montre parfaitement que le changement climatique influe sur les débits des sites de demande. Dans ce cadre, les ressources en eau du BV de la Lokoho vont subir une diminution. Heureusement ou sauf événement contraire, les eaux de la Lokoho sont jusqu'ici suffisantes pour compenser les périodes très sèches, d'où la nécessité d'une bonne gestion des ressources en eau.

IV-5 QUALITE DE L'EAU

Dans WEAP, la qualité est une sorte de contrainte qui limite l'offre pour la population.

Voici la comparaison entre la modélisation de la qualité des ressources en eau de surface et souterraine du BV de la Lokoho, norme respectée (figure 42), et celle au cas où la norme de potabilité n'est pas respectée (figure 43).

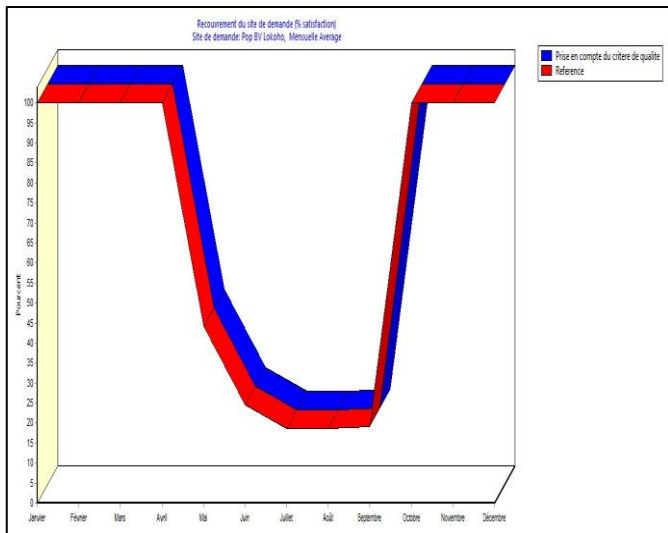


Figure 42 : Recouvrement avec norme respectée

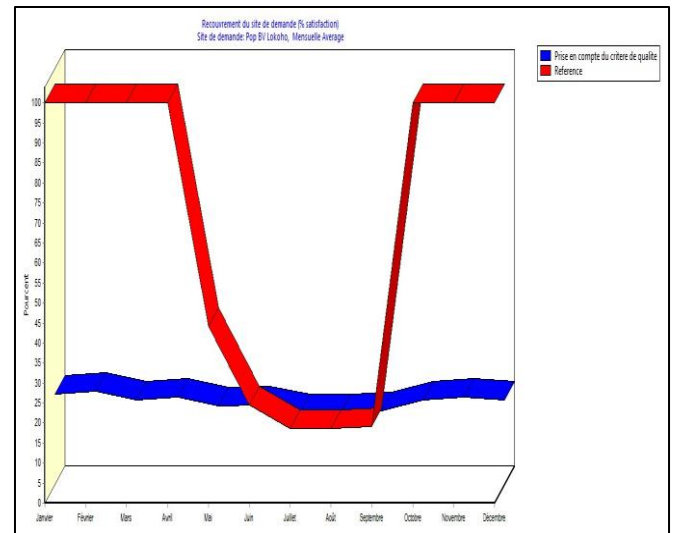


Figure 43 : Recouvrement avec norme non respectée

Pour la figure 42, le pourcentage de satisfaction est le même pour les 2 scénarios, mais pour la figure 43, le pourcentage de satisfaction pour le scénario « prise en compte de la qualité » est largement inférieur à celle du scénario de « référence ». On peut alors dire que, si on tient compte de la qualité de l'eau, et que si la norme concernant la potabilité n'est pas respectée, le taux de satisfaction des sites de demande va diminuer même pour la période pluvieuse du fait de l'existence ainsi d'une eau de « non qualité ».

Basée sur ces éléments de conceptualisation, nous pouvons ressortir des axes stratégiques à mettre en œuvre en matière de gestion des ressources en eau. C'est ce que nous allons développer dans le dernier chapitre.

CINQUIEME CHAPITRE :
ORIENTATIONS
STRATEGIQUES EN MATIERE
DE GESTION DES
RESSOURCES EN EAU

Il est clair que les éventuels changements (changement climatique, croissance de la population, etc.) qui peuvent survenir dans le bassin pourraient affecter l'équilibre des ressources en eau alors que les besoins en eau dans le BV vont indéniablement augmenter dans les années futures. Quoi qu'il en soit, un changement de mode de gestion des ressources en eau est requis. D'où la nécessité de prévoir des mesures et des stratégies d'adaptation.

Dans ce chapitre, nous allons voir les mesures et les techniques de gestion des ressources qui peuvent être appliquées ainsi que les stratégies d'adaptation vis-à-vis des changements dans les années futures.

V-1 CHANGEMENT DES PRIORITES DE L'ALLOCATION DE LA DEMANDE

V-2-1 Principe

Dans les tous les exercices précédents, on a posé que l'allocation de la demande en eau est faite de manière équitable pour tous les sites de demande. Maintenant, on va supposer que la demande en eau des populations est prioritaire par rapport à celle de l'agriculture et de l'élevage.

Dans WEAP, la priorité de la demande est un chiffre entre 1 et 99 et permet à l'utilisateur de spécifier l'ordre de satisfaction de la demande en eau des sites de demande. WEAP tente de satisfaire les exigences en eau des sites de demande avec une priorité égale à 1 avant les sites de demande avec une priorité égale à 2 ou supérieure. Si deux sites de demande présentent la même priorité, WEAP tente de satisfaire leurs exigences en eau équitablement. Les valeurs absolues n'ont pas de signification pour les niveaux de priorité. Seulement l'ordre relatif qui a un sens.

On va créer un nouveau scénario, hérité du scénario « référence », nommé « changement des priorités de la demande ». Pour ce faire, on change la priorité de la demande du site « agriculture » dans le nouveau scénario nouvellement créé en une valeur supérieure à 1. On va comparer les recouvrements du scénario « référence » avec ceux du « changement des priorités de la demande ».

V-2-2 Résultats

Le résultat graphique (figure 44) montre qu'entre le mois de Mai et Septembre, la demande en eau des 2 sites n'est pas satisfaite puisque cette période correspond à la période

sèche. La « population Lokoho » est la plus affectée par cette insatisfaction car l'agriculture nécessite plus de ressources en eau par rapport à la population.

Le recouvrement des sites sans la modification des priorités d'allocation de la demande est présenté par la figure 44 ci-dessous.

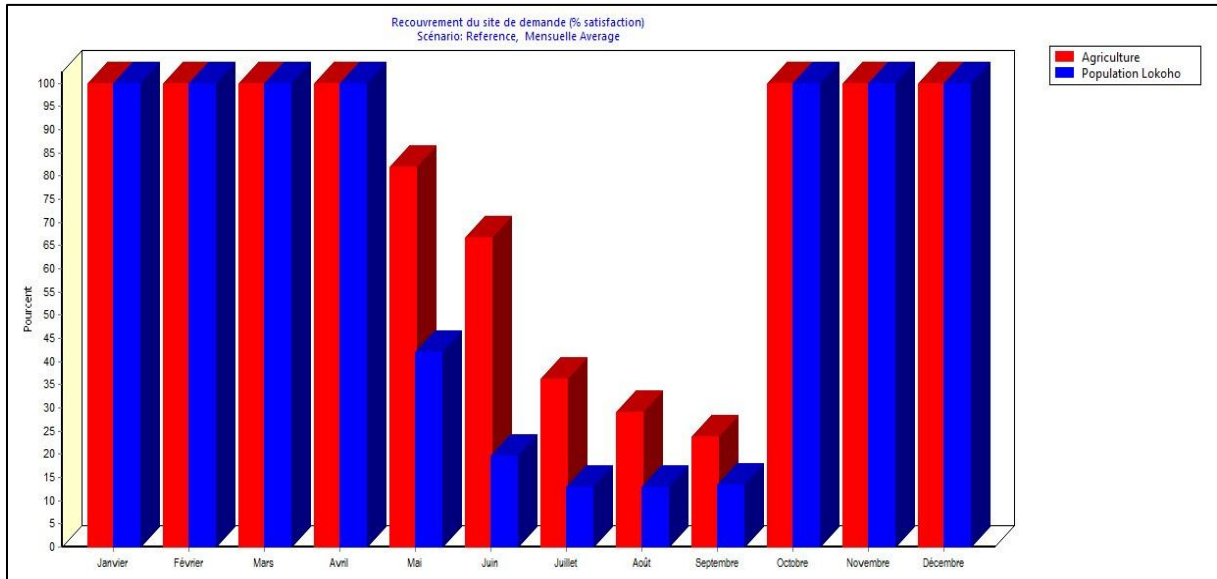


Figure 44 : Recouvrement mensuel des sites « agriculture » et « population Lokoho », scénario : « référence »

Celui avec le changement des priorités d'allocation est présenté par la figure 45 ci-après.

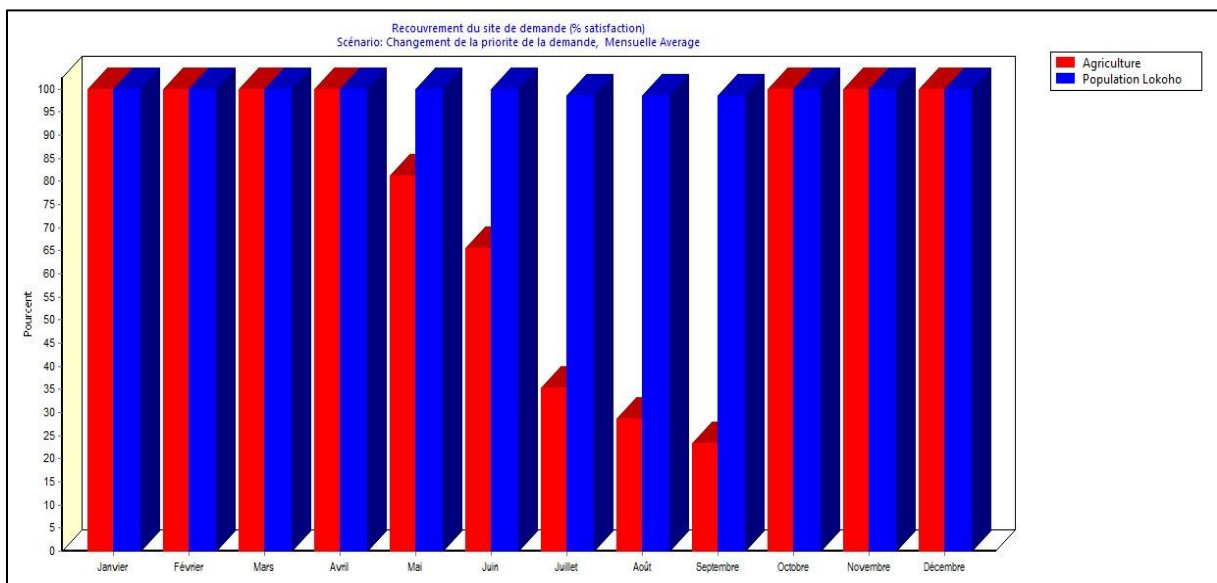


Figure 45 : Recouvrement mensuel des sites « agriculture » et « population Lokoho », scénario : « changement de la priorité de la demande »

On voit avec ce graphe que la demande du site « population Lokoho » est quasiment satisfaite toute au long de l'année, alors que celle de l'« agriculture » présente un déficit à partir du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre. Ce qui est évident parce qu'on a spécifié que la demande en eau de la population est prioritaire par rapport à celle de l'agriculture, alors l'alimentation en eau de l'agriculture ne se fait tant que la demande de la « population Lokoho » n'est pas satisfaite.

On peut dire alors que cette méthode de gestion est un bon moyen pour gérer l'eau dans le BV de la Lokoho, car elle permet de satisfaire les besoins en eau de la population. Les agriculteurs peuvent alors recourir à d'autres techniques pour leur culture. C'est ce que nous allons voir dans la section suivante.

V-2 RECYCLAGE DE L'EAU

V-2-1 Principe [32]

La réutilisation des eaux usées ou recyclage de l'eau consiste à récupérer les eaux usées après plusieurs traitements destinés à en éliminer les impuretés et éventuellement les micropolluants et les contaminants viraux et microbiens, afin de stocker et d'employer cette eau à nouveau.

Son objectif principal est non seulement de fournir des quantités supplémentaires d'eau de bonne qualité en accélérant le cycle d'épuration naturelle de l'eau, mais également d'assurer l'équilibre de ce cycle et la protection du milieu environnant. En fonction des exigences de qualité des consommateurs, deux grandes classes de réutilisation peuvent être définies :

- les usages domestiques (eau potable) qui peuvent être directs, après un traitement poussé, ou indirects, après passage dans le milieu naturel ;
- les autres usages dans les secteurs agricoles (irrigation), industriel et urbain.

La réutilisation de l'eau est essentiellement utilisée pour l'irrigation (70%), mais aussi essentiellement pour des utilisations qui ne nécessitent pas de l'eau potable.

WEAP comprend une fonction qui permet de modéliser le recyclage de l'eau, qui est la fonction « niveau de recyclage ». Prenons le site « agriculture » comme exemple d'application.

On peut voir l'impact du recyclage sur la demande en eau dans le site « agriculture » en créant un nouveau scénario hérité du scénario « référence », nommé « recyclage de l'eau de

l'agriculture ». On saisit les données sur ce scenario, dans le tableau « niveau de recyclage » du site « agriculture » (figure 46).

La fenêtre de saisie des données sur le niveau de recyclage est présentée dans la figure 46 ci-dessous.

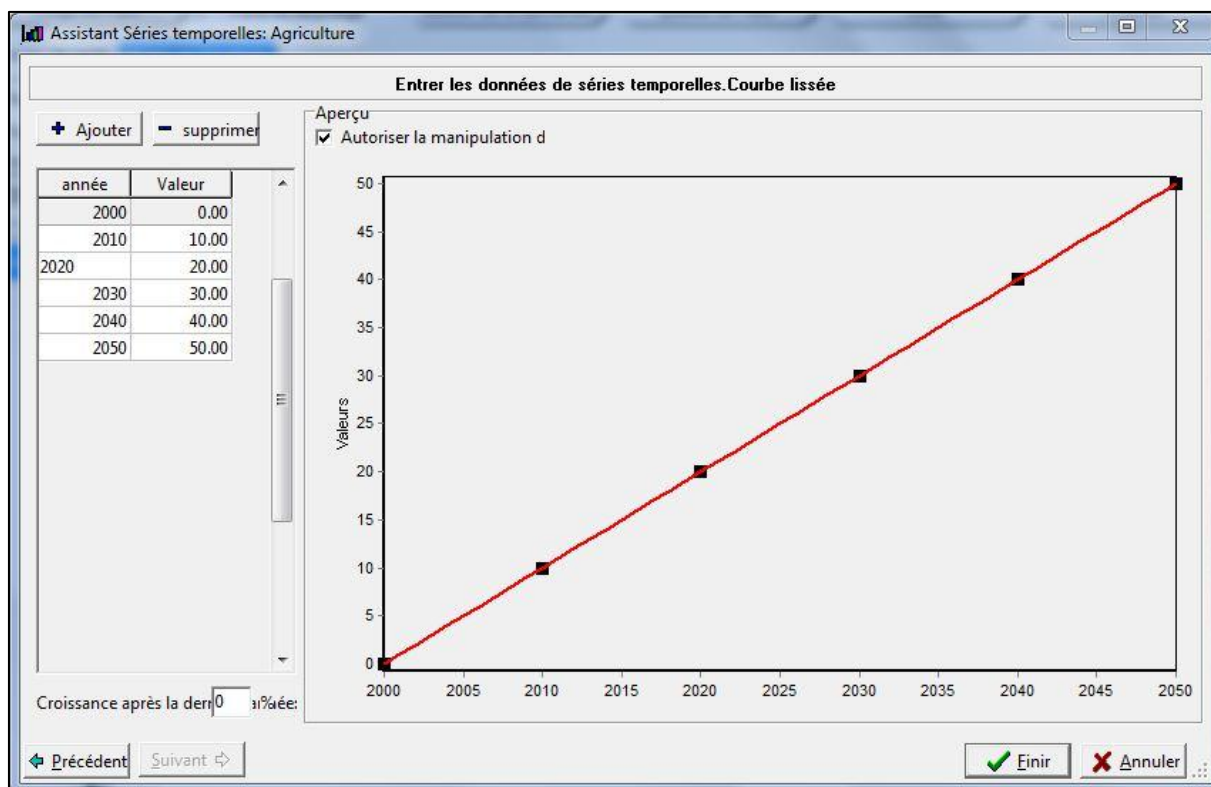


Figure 46 : Fenêtre d'introduction des données du « niveau de recyclage » de l'« agriculture »

Dans WEAP, le « niveau de recyclage » est le pourcentage de l'eau recyclée (réutilisée) dans un site de demande. On n'a pas besoin d'entrer toutes les valeurs de chaque année car WEAP possède une fonction appelée « *smooth* » qui permet de lisser les valeurs.

Le pourcentage des eaux recyclées de l'agriculture est présenté dans le tableau 27 ci-après.

Tableau 27 : Niveau de recyclage annuel de l'eau de l'« agriculture »

Années	Valeurs (%)	Années	Valeurs (%)
2000	0	2030	30
2010	10	2040	40
2020	20	2050	50

V-2-2 Résultat

Une différence significative est observée entre les 2 scénarios. Le graphe du scénario « référence » croît d'une manière exponentielle alors que celui du « recyclage » croît d'une manière régulière. Ce qui reflète bien la réalité car le recyclage de l'eau de l'agriculture permet de conserver l'eau et ainsi de répondre aux besoins d'une manière suffisante et constante. A la fin du scénario, la demande non satisfaite pour le scénario « référence » est de 587,13 mille m³ tandis que celle du « recyclage » est de 265,19 mille m³, soit 2 fois moins que celle du « référence ».

La figure 47 ci-dessous montre la demande non satisfaite de l'agriculture avec le nouveau scénario « recyclage de l'eau de l'agriculture ».

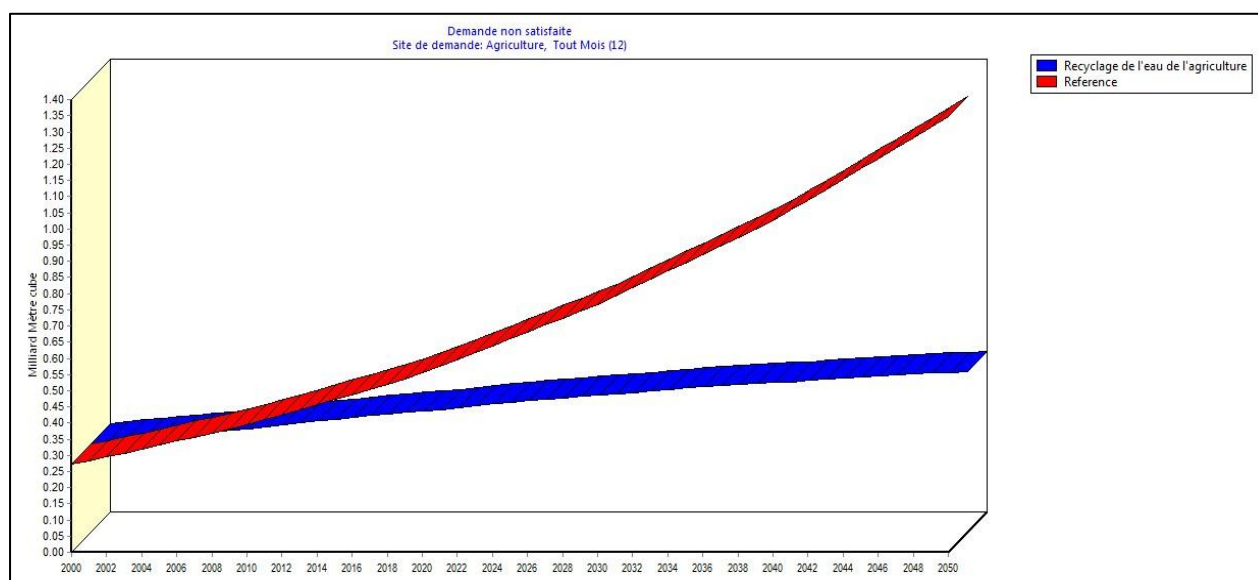


Figure 47 : Demande non satisfaite du site « agriculture », scénarios : « référence » et « recyclage de l'eau de l'agriculture »

On peut dire alors que, opter pour le recyclage ou la réutilisation de l'eau est l'une des meilleures options pour la gestion des ressources en eau dans le BV de la Lokoho, car elle réduit d'une façon concrète la demande non satisfaite, elle peut être applicable à chaque site de demande avec une technique de traitement des eaux bien adaptée.

V-3 DESALINISATION

Le dessalement (dessalage ou désalinisation) de l'eau est aussi un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable ou utilisable pour l'irrigation) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer).

Actuellement, plusieurs systèmes sont utilisés pour la désalinisation, mais les plus utilisés sont :

- la distillation ;
- l'électrodialyse ;
- l'osmose inverse.

Madagascar peut recourir largement à ce processus vu son état insulaire, malgré le coût élevé des systèmes.

V-3-1 Coût estimatif de chaque système de désalinisation [32]

Chacun de ces systèmes ont leurs propres caractéristiques, leur besoins en énergie. Les coûts de chaque système de désalinisation sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 28 : Coût de la distillation

Prix du m ³ (théorique)	Températures initiales de l'eau en °C
9,90 €	15
9,30 €	20
8,70 €	25

Tableau 29 : Coût de l'électrodialyse

Prix du m ³ (théorique)	Salinités	Types d'eau
0,30 à 0,80 €	1 à 10 g/L	Eau saumâtre
1,50 à 2,50 €	10 à 35 g/L	Eau de mer diluée
≥2,50 €	35 g/L	Eau de mer

Tableau 30 : Coût de l'osmose inverse

Prix du m ³ (théorique)	Concentrations	Pressions nécessaires
≤1 €	1 à 10 g/L	Faible
≈1 €	10 à 35 g/L	Moyenne
≥1 €	35 g/L	Forte

Source : <http://www.oboulo.com/>

On constate à partir de ces tableaux que de nombreux facteurs influent sur les coûts de ces techniques tels que la concentration en sel de l'eau à traiter, le type de l'eau de mer, la quantité d'énergie nécessaire, etc.

Toutefois à grande échelle, l'osmose inverse reste la méthode la plus rentable car elle est moins coûteuse que la distillation et l'électrodialyse. Elle permet aussi de traiter une plus grande quantité d'eau.

Le BV de la Lokoho est proche de la mer, on peut donc appliquer la désalinisation pour rendre potable l'eau de mer afin d'approvisionner la population du BV. A cet effet, nous allons choisir le traitement par osmose inverse comme technique applicable, dont la modélisation par WEAP est présentée par la suite.

V-3-2 Modélisation de la désalinisation par WEAP21

V-3-2-1 Principe

La désalinisation est surtout intéressante en termes d'approvisionnement en eau potable.

A cet effet, nous pouvons créer un nouveau scénario, hérité du scénario « référence », nommé « désalinisation » en ajoutant un élément dit « autre source » pour représenter cette nouvelle ressource en eau. Elle sera la ressource en eau de la population (Lokoho, Andapa 1) dans le BV (figure 48).

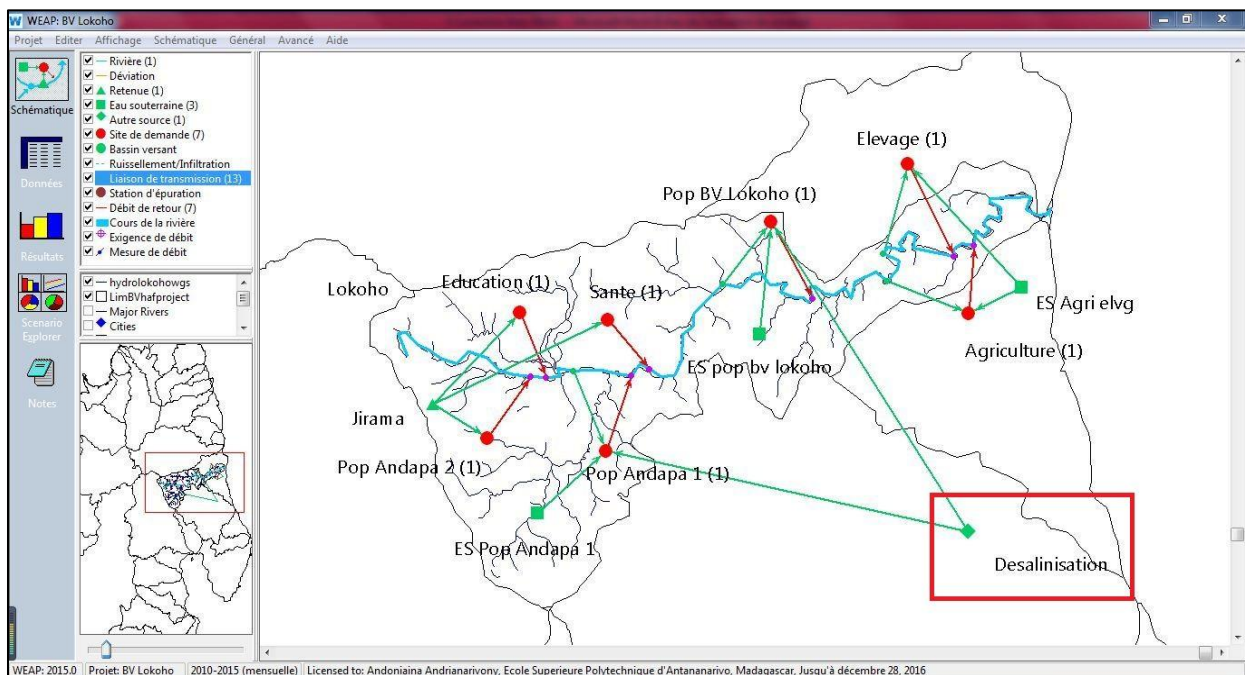


Figure 48 : Fenêtre montrant le nouvel élément « désalinisation »

Supposons que l'usine de traitement de l'eau de mer nouvellement créée va produire 500 000 m³/jour d'eau potable pour la population (Andapa 1 et BV Lokoho) avec un coût de 1,25 \$/m³, les résultats de la modélisation sont présentés ci-après.

V-3-2-2 Résultats

La figure 49 ci-dessous montre le taux de satisfaction de la population sans l'usine de désalinisation.

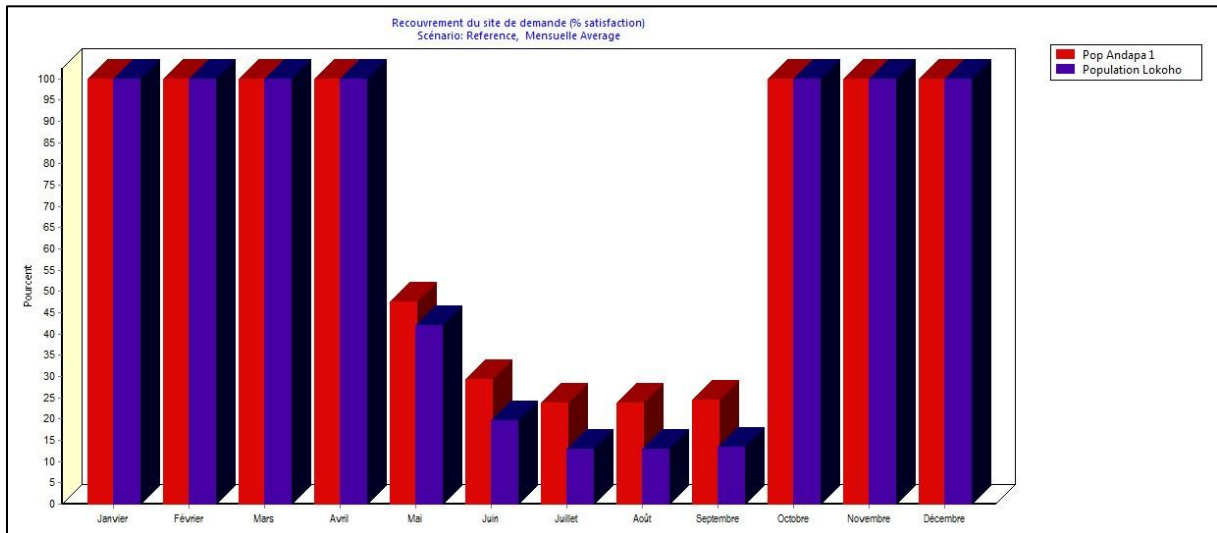


Figure 49 : Taux de satisfaction mensuel de la population « Andapa 1 » et « Lokoho » sans l'usine de désalinisation

Celui avec l'usine de traitement est présenté ci-après.

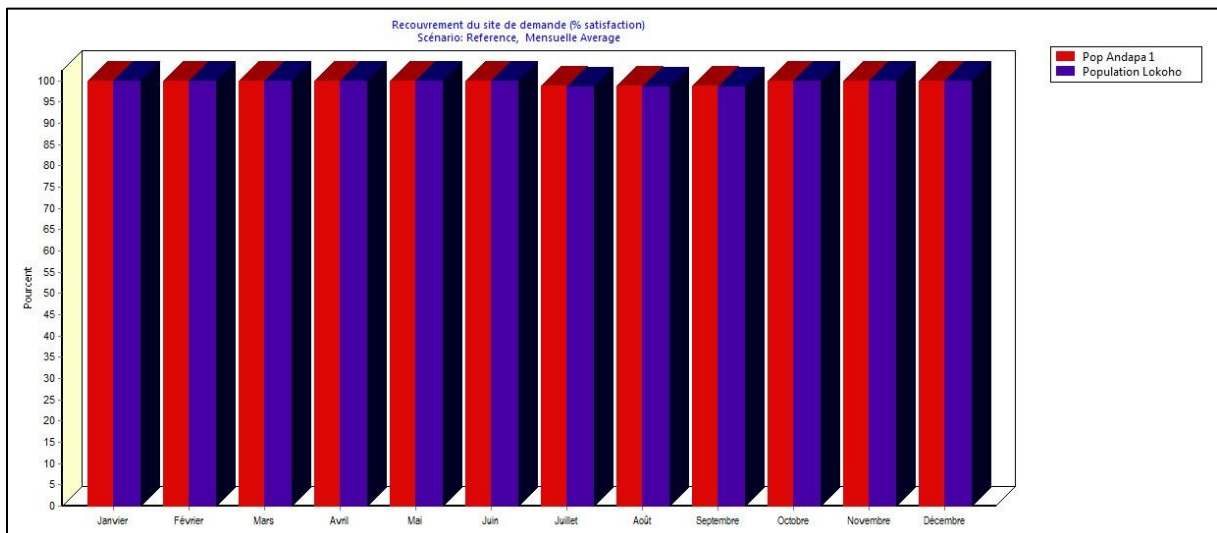


Figure 50 : Taux de satisfaction mensuel de la population « Andapa 1 » et « Lokoho » avec l'usine de désalinisation

En observant ces 2 graphes, on observe la différence du taux de recouvrement pendant certaine période. Les 2 populations présentent un très grand manque d'eau entre le mois de Mai jusqu'en Septembre pour la simulation sans l'usine de traitement. Alors qu'avec l'usine de traitement, la demande en eau est presque satisfaite tout au long de l'année.

On peut dire alors que l'ajout d'une usine de traitement de désalinisation de l'eau de mer est un moyen efficace pour compenser le manque d'eau de la population pendant la période sèche. Mais qu'en est-il du coût ?

La figure 51 ci-après montre le coût moyen unitaire de la désalinisation.

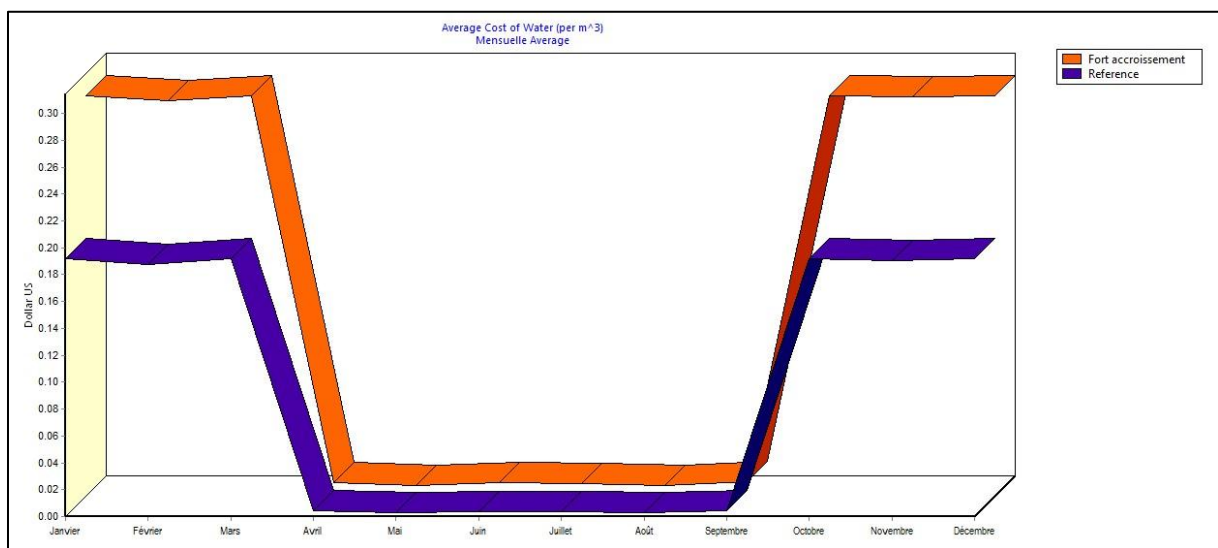


Figure 51 : Coût moyen unitaire mensuel de la désalinisation

Notons que le coût ici est le coût par unité de volume d'eau (m^3) de la maintenance. A partir du mois d'Avril jusqu'en mois de Septembre, le coût est négligeable car l'usine de traitement est actif durant cette période sèche, donc presque aucune maintenance n'est nécessaire. Durant la période pluvieuse, le coût est quasi constant car les autres sources peuvent assurer l'approvisionnement des sites de demande. L'usine de traitement est donc quasi en arrêt, durant lequel les opérations de maintenance sont réalisées.

V-4 OUTILS DE MISE EN OEUVRE DE LA GIRE

Les outils de mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) sont fondés sur les textes et réglementations ainsi qu'aux politiques et stratégies nationales. On peut citer :

V-4-1 Textes législatifs et réglementation concernant les ressources en eau

V-4-1-1 Code de la santé publique

Loi 62-072 du 29/03/63 modifiée par le Décret 65-657 du 29/09/65 relatif au captage des eaux de table et minérales parlent de l'origine des eaux, de la protection des points de prélèvements, des prélèvements, des ouvrages et de qualité des eaux.

L'Arrêté du 13/03/00 contient des articles sur les rejets polluants et la préservation des points d'eau.

V-4-1-2 Charte de l'environnement [11]

La charte de l'environnement Malagasy appliquée à Madagascar définit les grandes lignes de la politique Nationale de l'environnement et expose les principaux axes. Sa publication date du 21 décembre 1990 avec la loi : 90-033 et modifiée en 6 juin 1997 par la loi : 97-012. Elle fixe le cadre général d'exécution de la Politique de l'Environnement (PE) dont les modalités seront définies par les textes réglementaires d'application.

La Charte de l'Environnement insiste sur :

- la Politique Nationale de l'Environnement (PNE) ;
- le Plan d'Action Environnementale (PAE), qui constitue le fondement de toute action dans le domaine de l'environnement ;
- les programmes de PAE se conforment à une stratégie qui est définie à tous les niveaux de la Charte et sa mise en œuvre ;
- le Programmes ou Projets Environnementaux pour la mise en œuvre.

V-4-1-3 Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement ou Décret MECIE [12]

Le Décret MECIE est un décret d'application de la Charte de l'environnement depuis 1992, la troisième et dernière publication (1999) a pour objectif de fixer les différentes règles et procédures à suivre en vue de l'obtention d'un permis environnemental de tous les projets d'investissement. Les projets et aménagements devant être objets d'EE pour l'obtention de ce permis Environnemental et signalent l'importance de l'Information, Education et Communication des gens (IEC) sur les modes de propagation des maladies liées à la salubrité et à la pollution.

V-4-1-4 le Code de l'eau et les Décrets d'application [10]

La loi n°98-029 du 19 décembre 1998 portant Code de l'Eau, régit les prélèvements et les rejets. Les principaux objets de base énoncés dans ce document sont :

- la gestion, la conservation, et la mise en valeur des ressources en eau ;
- l'organisation du service public de l'AEP et de l'assainissement collectifs des eaux usées domestiques ;
- la police des eaux ;
- le financement de secteur eau et assainissement et hygiène.

Ce Code stipule qu'en vue d'assurer la gestion intégrée des ressources en eau et le développement rationnel du secteur de l'eau et de l'assainissement, il est créé l'Autorité nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ANDEA) sous la tutelle du cabinet du Premier Ministre et en relation avec les différentes structures gouvernementales, régionales et autres collectivités. Il y a actuellement des Décrets et projets de Décret d'application du Code de l'eau reposant sur :

- la création d'un comité de normalisation ;
- la création des Agences de bassin et fixant leur organisation et fonctionnement ;
- l'organisation, fonctionnement et financement de l'organisme régulateur du service public de l'Eau ;
- la réglementation tarifaire du service public de l'eau relatif ;
- les périmètres de protection ;
- les Agences de bassin ;
- les redevances de prélèvements d'eau ;
- la surveillance et contrôle des eaux ;
- l'utilisation hydro-électrique de l'eau ;
- le classement et déclassé des ressources ;
- l'organisation administrative de l'eau et au transfert de compétence ;
- la procédure d'octroi des autorisations de prélèvements de l'eau ;

- l'organisation, l'attribution et le fonctionnement de l'ANDEA ;
- l'application des documents de stratégie et de planification du secteur allant jusqu'à l'horizon 2018.

V-4-2 Politiques, stratégies et plans nationaux

Des politiques, stratégies et plans nationaux pouvant être liées à l'adaptation au changement climatique ont été élaborées dont :

- la Politique Sectorielle de l'Eau et de l'Assainissement ;
- le PNAEPA (Programme National d'Alimentation en Eau Potable et d'Assainissement) ;
- la politique et Stratégie Nationale pour l'Assainissement (PSNA);
- les documents de stratégie et de planification du secteur Eau, Assainissement et Hygiène à l'horizon 2018 ;
- le Plan d'Action National d'Adaptation (PANA) ;
- la Politique Nationale de la Lutte contre le Changement Climatique(PNLCC) ;
- la Politique Nationale de Lutte Contre la Désertification (PNLCD).

D'autres sont encore en cours d'élaboration, dont :

- le Plan d'Action pour la mise en œuvre de la PNLCC (PANLCC) en cours d'élaboration ;
- le Programme National d'Adaptation (PAN) en cours d'élaboration.

V-4-3 Structure gérant les ressources en eau

La gestion des ressources en eau est structurée par une organisation entre :

- le Ministère de l'eau Le Ministère de l'Eau, chargé de la mise en application de la politique du secteur a été créé en 2008 ;
- l'ANDEA, au niveau national, pour assurer la gestion intégrée des ressources en eau et le développement rationnel du secteur de l'eau et de l'assainissement ;
- les Agences de bassin, niveau interrégional, représentant de l'ANDEA, pour élaborer le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (SDAGIRE) ;

- les Comités de bassin, au niveau régional, pour proposer de(s) SDAGIRE (s) ;
- les Comités des Points d'Eau (CPE) et les Associations des Usagers de l'Eau (AUE), niveau local, pour assurer le bon fonctionnement des infrastructures d'adduction d'eau.

L'efficacité de la GIRE dépend de l'application de ces textes et réglementations concernant directement ou indirectement les ressources en eau. Elle nécessite aussi la mise en place des structures de gestion fonctionnelles et aptes à atteindre les objectifs de la GIRE.

CONCLUSION

La présente étude nous a permis de modéliser de façon concrète le comportement hydrologique du bassin versant de la Lokoho et le modèle WEAP21 s'y prête assez bien. Ainsi, le modèle sera mis à la disposition des techniciens et autres utilisateurs. Un outil sans doute sujet à amélioration, mais suffisamment solide pour fournir une information nouvelle et de bonne qualité dans la problématique de gestion des ressources en eau sur les bassins versants et plus particulièrement sur le bassin versant de la Lokoho.

Les résultats de l'étude montrent que les ressources en eau du bassin versant de la Lokoho sont vulnérables entre autres au changement climatique ainsi qu'à la croissance démographique, alors que les besoins en eau augmentent très rapidement. Au rythme actuel, la demande non satisfaite croît d'une manière exponentielle surtout pour l'agriculture dans les années à venir, tandis que les ressources en eau tendent à la diminution ou à la constante. Il faut donc chercher une solution immédiate et durable pour faire face au risque réel de manque, voire de pénurie d'eau. Le devenir des Communes dans le bassin versant est donc lié au changement climatique futur qui est à son tour dépend de l'état de l'environnement.

Ainsi, pour y faire face et afin de mieux gérer les ressources, nous recommandons :

- l'application stricte des textes législatif et réglementaire pour mieux gérer les ressources en eau du bassin ;
- la mise en place des structures de gestion fonctionnelles et aptes ;
- l'utilisation modérée des ressources en eau ;
- la réutilisation de l'eau pour l'agriculture ;
- la recherche de nouvelle ressource (eau de mer) pour la population ;
- la protection de l'environnement.

Toutefois, au vu du manque de données qui nous a limité, le volet financier n'a pas pu être traité comme il se doit. Néanmoins, la présente pourra servir de base pour de futures études encore plus approfondies, notamment sur la faisabilité et la rentabilité d'un projet de mise en œuvre des propositions découlant de la modélisation des ressources en eau, autant en quantité qu'en qualité, traitée ici. Dans ce cadre, le logiciel WEAP21 restera l'outil le plus adapté pour une gestion intégrée des ressources en eau, et pourra être vulgarisé pour traiter le cas de tous les bassins versants de Madagascar.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

Ouvrages et mémoires

- [1] ANDRIANIRINA M., RAKOTOBE R. H. et RALAIMARO J. (2014) : « Etude de la vulnérabilité et de l'adaptation au changement climatique secteur ressources en eau », Rapport troisième communication nationale, Juin 2014, 55p.
- [2] CABINET ECR (2013) : « Etude d'Impact Environnemental et Social (EIES) et élaboration d'un Plan d'Action de Recasement (PAR) au niveau APD pour les travaux de captage et irrigation du périmètre d'Ankaibe », Rapport du projet Bassins Versants et Périmètres Irrigués (BVPI), juin 2013, 138p.
- [3] CASTANY (1982) : « Principes et méthodes de l'Hydrogéologie », Edition Dunod, 238p.
- [4] CHAPERON P., DANLOUX J. et FERRY L. (1993) : « Fleuves et rivières de Madagascar », DMH, CNRE, ORSTOM. Paris, 1993, 811p.
- [5] EDOUARD C. (1995) : « Modélisation du régime hydrologique du bassin versant de Rwegura (Burundi) : Evaluation de la contribution des écoulements souterrains », Maître ès Sciences, 62p.
- [6] GWP, PNUD (2005) : « Plans de gestion intégrée des ressources en eau », Manuel de formation et guide opérationnel, Mars 2005, 72p.
- [7] LE COZ M. (2007) : « Modélisation hydrologique distribuée : Application au Bassin Versant du Lac Tchad », Master Recherche Eau et Environnement – SupAgro Montpellier, 59p.
- [8] MAHAMOUD D. (2010) : « Modélisation avec WEAP21 en vue d'une gestion intégrée des ressources en eau du bassin versant lacustre d'Alaotra », Mémoire DEA, Option : Génie minéral, ESPA, Université d'Antananarivo, 75p.
- [9] Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (2003) : « Monographie de la Région SAVA », Unité de Politique pour le Développement Rural (UPDR), juin 2003, 105p.
- [10] Ministère de l'Energie et des Mines (1999) : Code de l'eau (Loi N° 98 – 029), Janvier 1999.
- [11] Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (1997) : « Charte de l'Environnement Malagasy », publiée le 21 décembre 1990 avec la loi : 90-033 et modifiée en 6 juin 1997 par la loi : 97-012, 14.

[12] Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (2004) : « Décrets MECIE », Décret n° 99-954 du 15 décembre 1999 modifié par le décret n° 2004-167 du 03 février 2004 relatif à la mise en compatibilité des investissements avec l'environnement, 20p.

[13] NEUVY G. (1979) : « Aménagement régional à Madagascar. La cuvette d'Andapa », Revue de Géographie N°35. Juillet-Décembre 1979.

[14] RABEFITIA Z. (2007) : « Préparation de la seconde communication nationale. Elaboration des scénarios de changement climatique pour les études de vulnérabilité et adaptation », Rapport provisoire, Décembre 2006.

[15] RANDRIAMAHERISOA A. et BINARD M. (1992) : « Régionalisation des paramètres du modèle maillé : Impact de la déforestation sur le régime hydrologique de la Lokoho (Madagascar) », VIIIe Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, 283p.

[16] RANDRIAMANGA S. et ANDRIAMIHAMINA M. (1997) : « Etude de la végétation du bassin versant d'Andapa et intégration des données dans un SIG », Rapport de recherche, 59p.

[17] RAONIMAHARIVO M. (2011) : « Etudes hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines de la Région SAVA (Nord-est de Madagascar) », Mémoire DEA, option : Génie minéral, ESPA, Université d'Antananarivo, 71p.

[18] RAKOTOMALALA J. (2010) : « Modélisation hydrogéologique du bassin versant de la Menarandra, avec le logiciel Rockworks 15 », Mémoire ingénieur des mines, ESPA, Université d'Antananarivo, 87p.

[19] RAKOTONDRABE F. (2006) : « Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP21 : cas du bassin versant de Morondava (Sud-ouest de Madagascar) », Mémoire DEA, Spécialisation : Hydrogéologie, ESPA, Université d'Antananarivo, 84p.

[20] RAKOTOZAVY V. H. (2012) : « Caractérisation hydrogéologique du bassin versant de Sofia, Région SOFIA (Nord-ouest de Madagascar) », Mémoire DEA, Option : Génie minéral, ESPA, Université d'Antananarivo, 75p.

[21] VALERIE B. (2011) : « Le bassin versant », Cours d'Hydrologie Générale Module FLST403 L2 Montpellier 2011, 25p.

[22] YOUNOUSSA A. (2007) : « Etude de la vulnérabilité et d'adaptation des ressources en eau face aux changements climatiques. Modélisation par le logiciel WEAP21 : cas du Haut bassin versant de l'Ikopa (Hautes Terres Centrales de Madagascar) », Mémoire DEA, Département Mines, Option Génie Minéral, ESPA, Univ. D'Antananarivo, Nov 2007, 87p.

Webographies

- [23] <http://www.astrosurf.com/>, consulté le 17 Décembre 2015
- [24] <http://www.cieau.com/>, consulté le 10 Février 2016
- [25] <http://www.cnrs.fr/>, consulté le 17 Décembre 2015
- [26] <http://www.cosmovisions.com/>, consulté le 05 Août 2016
- [27] <http://www.estruagua.com/>, consulté le 30 Janvier 2016
- [28] <http://www.intellego.fr/>, consulté le 22 Juillet 2016
- [29] <http://www.lemonde.fr/>, consulté le 03 Janvier 2016
- [30] <http://www.madarevues.recherches.gov.mg/>, consulté le 30 Janvier 2016
- [31] <http://www.madatours.com/>, consulté le 03 Janvier 2016
- [32] <http://www.oboulo.com/>, consulté le 22 Juillet 2016
- [33] <http://www.spge.be/fr/>, consulté le 10 Février 2016
- [34] <http://www.transmad.org/>, consulté le 05 Août 2016
- [35] <http://www.weap21.org/>, consulté le 12 Décembre 2015
- [36] <http://fr.wikipedia.org/>, consulté le 12 Décembre 2015

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
GLOSSAIRE	ix
INTRODUCTION	1
PREMIER CHAPITRE : CONCEPT DE BASE ET ETUDES ANALYTIQUES DES RESSOURCES EN EAU	2
I-1 LES DIFFERENTS TYPES DE RESSOURCES EN EAU	3
I-1-1 Précipitations ou ressources en eau de précipitation.....	3
I-1-2 Ressources en eaux de surface	4
I-1-2-1 Ruisseaux, rivières et fleuves.....	4
I-1-2-2 Lac et marais	4
I-1-3 Les ressources en eaux souterraines	5
I-1-3-1 Cycle de l'eau	5
I-1-3-2 Origine des eaux souterraines	6
I-2 GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE)	6
I-2-1 Notion d'intégration.....	7
I-2-2 Cycle de planification	7
I-2-2-1 Initiation.....	7
I-2-2-2 Planification de travail et participation des parties prenantes.....	8
I-2-2-3 Création d'une vision stratégique	9
I-2-2-4 Analyse situationnelle	9
I-2-2-5 Stratégies de gestion de l'eau.....	9
I-2-2-6 Plan GIRE préparé et approuvé	9
I-3 BASSIN VERSANT	10
I-3-1 Bassin versant topographique ou hydrographique	11
I-3-2 Bassin versant hydrogéologique	11
DEUXIEME CHAPITRE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	12
II-1 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	13

II-2 CONTEXTE CLIMATIQUE	13
II-2-1 Précipitations	14
II-2-2 Température	15
II-2-3 Evapotranspiration	17
II-2-4 Vents et cyclones	18
II-3 HYDROGRAPHIE-HYDROGEOLOGIE	18
II-3-1 Hydrographie	18
II-3-2 Hydrogéologie	19
II-4 CONTEXTE GEOLOGIQUE	21
II-5 CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE	22
II-5-1 Contexte social	22
II-5-1-1 Population	22
II-5-1-2 Santé	23
II-5-1-3 Besoin en eau potable	23
II-5-2 Contexte économique	24
II-5-2-1 Agriculture	24
II-5-2-2 Elevage	25
II-5-2-3 Pêches et ressources halieutiques	26
TROISIEME CHAPITRE : MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN	
VERSANT DE LA LOKOHO	28
III-1 PRESENTATION DU LOGICIEL WEAP21	29
III-1-1 Description du logiciel WEAP21	29
III-1-2 Acquisition et installation	30
III-1-3 Structure du modèle	31
III-1-3-1 Cartographie	31
III-1-3-2 Données	31
III-1-3-3 Résultats	32
III-1-3-4 Schéma synoptique	32
III-1-3-5 Notes	32
III-1-4 Principe de fonctionnement	32
III-1-4-1 Création d'un nouveau projet d'étude	33
III-1-4-2 Définition des paramètres généraux	33
III-1-4-3 Création des hypothèses clés	33
III-1-4-4 Introduction des éléments dans la cartographie	33

III-1-4-5	Entrée ou saisie des données de chaque élément	33
III-1-4-6	Exécution du modèle et affichage des résultats	34
III-2	APPLICATION DU MODELE « WEAP21 » AU BASSIN VERSANT DE LA LOKOHO	34
III-2-1	Présentation des données	35
III-2-1-1	Sites de demande	35
III-2-1-2	Eaux de surface disponibles	36
III-2-1-3	Eaux souterraines disponibles	37
III-2-1-4	Hydrologie.....	39
III-2-1-5	Qualité de l'eau	40
III-2-2	Modélisation par WEAP21	41
III-2-2-1	Cartographie du modèle	41
III-2-2-2	Raffinage des sites de demande.....	43
III-2-2-3	Création des hypothèses clés.....	44
III-2-2-4	Création des scénarios	46
III-2-2-5	Modélisation de l'eau souterraine	49
III-2-2-6	Création d'un ensemble de polluants et modélisation de la qualité	49
III-2-2-7	Saisie des données	50
QUATRIEME CHAPITRE : PRESENTATION DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS		53
IV-1	PRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DU MODELE.....	54
IV-2	CLIMATS	54
IV-2-1	Précipitations dans le bassin versant	54
IV-2-2	Ruissellement d'eau de pluie dans le bassin versant.....	55
IV-2-3	Evapotranspiration	56
IV-2-3-1	Evapotranspiration potentielle (ETP).....	56
IV-2-3-2	Différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle (ETP-ETR)	56
IV-3	DISTRIBUTIONS ET RESSOURCES	57
IV-3-1	Débits entrant vers les eaux souterraines (recharge).....	57
IV-3-2	Débits sortant des sites de demande.....	58
IV-3-3	Débits de rivière	59
IV-3-4	Stockage d'eau souterraine	59
IV-4	DEMANDE ET BESOINS EN EAU.....	60
IV-4-1	Besoins en eau des sites de demande	60

IV-4-2 Eau distribuée.....	61
IV-4-3 Demande non satisfaite	63
IV-4-4 Recouvrement des besoins en eau.....	64
IV-4-5 Débits des sites de demande.....	65
IV-5 QUALITE DE L'EAU	65
CINQUIEME CHAPITRE : ORIENTATIONS STRATEGIQUES EN MATIERE DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU	67
V-1 CHANGEMENT DES PRIORITES DE L'ALLOCATION DE LA DEMANDE.....	68
V-2-1 Principe.....	68
V-2-2 Résultats	68
V-2 RECYCLAGE DE L'EAU.....	70
V-2-1 Principe.....	70
V-2-2 Résultat.....	72
V-3 DESALINISATION.....	72
V-3-1 Coût estimatif de chaque système de désalinisation	73
V-3-2 Modélisation de la désalinisation par WEAP21	74
V-3-2-1 Principe.....	74
V-3-2-2 Résultats	75
V-4 OUTILS DE MISE EN OEUVRE DE LA GIRE	76
V-4-1 Textes législatifs et réglementation concernant les ressources en eau.....	77
V-4-1-1 Code de la santé publique.....	77
V-4-1-2 Charte de l'environnement	77
V-4-1-3 Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement ou Décret MECIE	77
V-4-1-4 le Code de l'eau et les Décrets d'application	78
V-4-2 Politiques, stratégies et plans nationaux.....	79
V-4-3 Structure gérant les ressources en eau	79
CONCLUSION	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES	82
TABLE DES MATIERES	85
ANNEXES	89

ANNEXES

ANNEXE N°01 : NORMES DE POTABILITE DES EAUX RECOMMANDEES PAR L'OMS

Catégories	Caractéristiques	Symbole	Unités	Eaux souterraines
Caractères physico-chimiques et organoleptiques	Température	T°	°C	7-25
	Couleur	Coul	U-Pt	0-20
	Turbidité	Tu	g/m ³	0-20
	Goût, odeur		seuil	1-4
	Pouvoir colmatant	Po	L	0.01-1
	pH	pH		5.5-8
	Résistivité	R	Ko/cm	1-5
	Dissolution O ₂		mg /l	> ou = 5
Examen préliminaire	Minéralisation			
	Dureté total	TH	°F	0-60
	Alcalinité	TAC	°F	0-40
Signes de pollution	Matière organique en milieu alcalin	MC	mg/l	0-3
	Azote ammoniacal	NH ₄	mg/l	0-1
	Azote nitreux	NO ₂	mg/l	0-0.5
Éléments toxiques ou indésirables	CO ₂ agressif	CO ₂	mg/l	0-100
	Fluorures	N	mg/l	0-10
	Chlorures	Cl	mg/l	0-500
	Sulfates	SO ₄	mg/l	0-500
	Nitrates	NO ₃	mg/l	0-20
	Cyanures	CN	mg/l	0
	Chromates	CrO ₄	mg/l	0
	Chlores libres	Cl	mg/l	0
	Silice	SiO ₂	mg/l	0-80
	Phénols		mg/l	0
Cations	Sodium	Na	mg/l	<i>Liés à SO₄ et Cl</i>
	Potassium	K	mg/l	
	Magnésium	Mg	mg/l	0-200
	Calcium	Ca	mg/l	0-200
	Fer	Fe	mg/l	0-10
	Cuivre	Cu	mg/l	0
	Zinc	Zn	mg/l	0
	Aluminium	Al	mg/l	0-5
	Plomb	Pb	mg/l	0
	Arsenic	As	mg/l	0
	Sélénium	Se	mg/l	Traces
	Uranium	U	mg/l	Traces
	Manganèse	Mn	mg/l	0-5
Qualité bactériologique	Coliformes totaux			10/100
	Coliformes fécaux			Absence dans 100 ml

Sources : Actes des journées de l'eau 16-20 Nov 1992 Qualité de l'eau

ANNEXE N°02 : NORMALE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS (1961-1990)

STATION : SAMBAVA												
			Latitude: 14°17'S			Longitude:50°110'E			Altitude: 5 m-			
MOIS	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
NORMALES	342,2	257,2	284,4	227,1	183,3	182,6	176,3	194,9	100,4	109,3	132	219,3
Nb jours	19,9	16,9	20,3	18,3	17,9	18,5	21,6	22,6	19	18,1	18,2	19,8
max 24h & date	354,6 - 31/66	300,0 - 17/73	153,0 - 25/76	181,1 - 08/84	183,1 - 20/75	106,6 - 15/71	75,8 - 23/67	93,5 - 21/68	73,7 - 21/83	81,7 - 15/80	121,1 - 23/71	146,8 - 26/65
STATION : ANTSIRANANA												
			Latitude: 12°21'S			Longitude: 49°19'E			Altitude: 105 m			
MOIS	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
NORMALES	337,5	305,8	179,4	52,3	13,4	19,1	19	18,7	8,8	17,4	54,6	170,8
Nb jours	19,7	18,2	16,8	9,2	7	6,2	7,3	8	5,6	6,6	9	15,7
max 24h & date	330,1 - 18/62	230,4 - 16/73	146,4 - 07/72	53,1 - 13/80	25,5 - 15/74	62,0 - 23/63	26,4 - 26/75	30,1 - 21/69	17,6 - 13/79	90,0 - 30/86	380,0 - 29/76	200,7 - 12/75
STATION : ANDAPA												
			Latitude: 14°39'S			Longitude: 49°37'E			Altitude: 474 m			
MOIS	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
NORMALES	365,9	313,1	263,3	135,3	72,8	75,8	84,5	93,8	43,6	46,6	99,7	263,9
Nb jours	23,1	21,2	23,4	20	17,8	19,6	23,4	23,6	16,4	14,4	14,1	19,5
Max 24h & date	228,4 - 15/68	117,1 - 28/73	116,0 - 02/62	59,5 - 16/76	50,1 - 25/66	33,0 - 23/74	35,1 - 23/67	59,5 - 21/69	21,0 - 12/72	38,5 - 20/67	94,5 - 18/69	136,8 - 17/71

Source : Andrianirina et al (2014)

ANNEXE N°03 : QUELQUES RESULTATS DE LA MODELISATION

I-DEMANDE

I-1 Demande en eau (m³)

Branche: Sites de demande, Scénario: Référence, Total annuel

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sommes
Agriculture	6.79E+08	7.53E+08	8.27E+08	9.18E+08	1.01E+09	1.12E+09	1.23E+09	1.36E+09	1.50E+09	1.66E+09	1.83E+09	1.29E+10
Education	2.31E+05	2.58E+05	2.88E+05	3.21E+05	3.58E+05	3.99E+05	4.45E+05	4.96E+05	5.53E+05	6.16E+05	6.87E+05	4.65E+06
Elevage	1.61E+06	2.52E+06	3.95E+06	6.22E+06	9.82E+06	1.55E+07	2.45E+07	3.87E+07	6.12E+07	9.69E+07	1.53E+08	4.14E+08
Pop Andapa 1	1.10E+06	1.23E+06	1.37E+06	1.53E+06	1.70E+06	1.90E+06	2.12E+06	2.36E+06	2.63E+06	2.93E+06	3.27E+06	2.21E+07
Pop Andapa2	5.76E+03	6.43E+03	7.17E+03	7.99E+03	8.91E+03	9.93E+03	1.11E+04	1.23E+04	1.38E+04	1.53E+04	1.71E+04	1.16E+05
Population Lokoho	5.18E+05	5.77E+05	6.44E+05	7.18E+05	8.00E+05	8.92E+05	9.95E+05	1.11E+06	1.24E+06	1.38E+06	1.54E+06	1.04E+07
Santé	1.05E+04	1.17E+04	1.31E+04	1.46E+04	1.62E+04	1.81E+04	2.02E+04	2.25E+04	2.51E+04	2.80E+04	3.12E+04	2.11E+05
Sommes	6.82E+08	7.57E+08	8.33E+08	9.27E+08	1.02E+09	1.14E+09	1.26E+09	1.41E+09	1.56E+09	1.76E+09	1.99E+09	1.33E+10

I-2 Demande non satisfaite (m³)

Tout Site de demande, Scénario: Référence, Total annuel

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sommes
Agriculture	2.73E+08	3.31E+08	3.95E+08	4.72E+08	5.54E+08	6.60E+08	7.66E+08	8.96E+08	1.03E+09	1.19E+09	1.35E+09	7.91E+09
Education	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Elevage	1.72E+05	3.24E+05	6.01E+05	1.08E+06	1.90E+06	3.38E+06	5.83E+06	9.96E+06	1.67E+07	2.80E+07	4.65E+07	1.14E+08
Pop Andapa 1	1.69E+05	2.65E+05	3.13E+05	3.65E+05	5.32E+05	6.14E+05	7.06E+05	8.08E+05	9.21E+05	1.05E+06	1.19E+06	6.93E+06
Population Lokoho	9.51E+04	1.46E+05	1.67E+05	1.92E+05	2.75E+05	3.16E+05	3.57E+05	4.05E+05	4.59E+05	5.18E+05	5.83E+05	3.51E+06
Santé	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sommes	2.73E+08	3.32E+08	3.96E+08	4.74E+08	5.57E+08	6.64E+08	7.73E+08	9.07E+08	1.04E+09	1.22E+09	1.40E+09	8.03E+09

II-RESSOURCES

II-1 Débits entrant dans l'aire (m³)

Tout Point d'entrée de débit, Scénario: Référence, Total annuel

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sommes
Eau S. Agriculture Elevage	1.70E+07	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.56E+08	1.58E+09
Eau S. de pop Lkh	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.87E+08
Eau S. pop Andapa	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.70E+07	1.87E+08
JIRAMA Andapa	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.44E+11	2.69E+12
bv lokoho	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.51E+08	3.86E+09
Sommes	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.45E+11	2.69E+12

II-2 Débit (m³)

Tout Scénario, Rivière: Lokoho, En dessous de Lokoho Débit de tête, Total annuel

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sommes
Changement climatique	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	2.22E+09	2.48E+09	2.48E+09	1.37E+09	1.20E+09	1.71E+09	2.22E+09	2.48E+09	2.13E+10
Changement de la priorité de la demande	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.88E+10
Fort accroissement	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.88E+10
Fort accroissement avec changement climatique	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	2.22E+09	2.48E+09	2.48E+09	1.37E+09	1.20E+09	1.71E+09	2.22E+09	2.48E+09	2.13E+10
Référence	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.88E+10
Séquence de climat sec prolongé	1.71E+09	1.71E+09	1.71E+09	1.37E+09	1.37E+09	1.37E+09	1.37E+09	1.20E+09	1.37E+09	1.20E+09	1.20E+09	1.56E+10

II-3 Stockage d'eau souterraine (m³)

Tout Aquifère, Scénario: Référence, Tout Mois (12), Moyenne mensuelle

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Eau S. Agri Elvg	4.30E+08	4.34E+08	4.37E+08	4.38E+08	4.38E+08	4.38E+08
Eau S. de pop Lkh	4.27E+08	4.31E+08	4.34E+08	4.35E+08	4.35E+08	4.35E+08
Eau S. de pop Andapa	4.20E+08	4.24E+08	4.27E+08	4.27E+08	4.27E+08	4.28E+08
Sommes	1.28E+09	1.29E+09	1.30E+09	1.30E+09	1.30E+09	1.30E+09
	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Eau S. Agri Elvg	4.39E+08	4.40E+08	4.40E+08	4.40E+08	4.40E+08	4.43E+08
Eau S. de pop Lkh	4.36E+08	4.37E+08	4.37E+08	4.37E+08	4.37E+08	4.39E+08
Eau S. de pop Andapa	4.28E+08	4.29E+08	4.29E+08	4.29E+08	4.29E+08	4.32E+08
Sommes	1.30E+09	1.31E+09	1.31E+09	1.31E+09	1.30E+09	1.31E+09

III- CLIMAT

III-1 Précipitation (m³)

Branche: Site de demande et bassin versant, Moyenne mensuelle

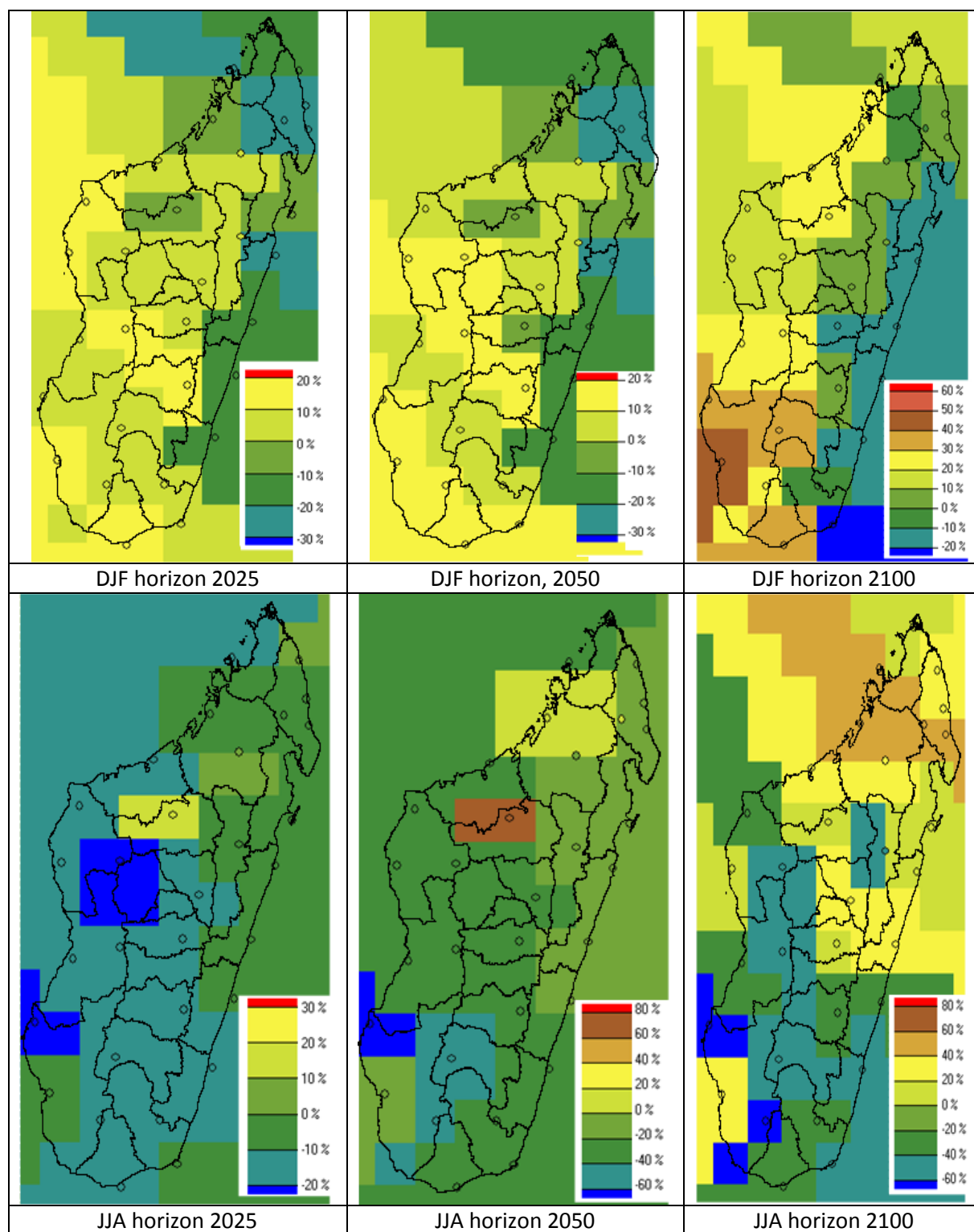
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Somme
Référence	7.16E+07	5.50E+07	4.71E+07	2.54E+07	1.45E+07	1.36E+07	1.54E+07	1.96E+07	8.57E+06	8.16E+06	2.19E+07	4.97E+07	3.51E+08

III-2 Différentiel d'ET (ETPot.-ETRéal.) (m³)

Scénario: référence, Branche: Site de demande et bassin versant, Moyenne mensuelle

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Somme
Référence	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.98E+06	8.70E+05	0.00E+00	0.00E+00	5.53E+06	9.61E+06	2.30E+06	0.00E+00	2.23E+07

ANNEXE N°04 : CARTE DE CHANGEMENT DES PRECIPITATIONS (1961-1990)



DJF : (Décembre-Janvier-Février) ; JJA : Juin-Juillet-Août)

Source : Rabefitia (2007)

Titre : « Modélisation hydrologique par WEAP21 pour une gestion intégrée des ressources en eau : cas du bassin versant de la Lokoho (Nord-est de Madagascar) »

Nombre de pages : 81 ; nombre de tableaux : 30 ; nombre de figures : 51

Résumé :

La présente étude est portée sur la modélisation hydrologique par WEAP21 du bassin versant de la Lokoho (Nord-est de Madagascar) et vise à mettre en place un système de gestion durable et efficace des ressources en eau pour faire face au risque de pénurie d'eau de la Région.

L'objectif principal a été de modéliser les ressources en eau disponibles, les besoins des sites de demande et leur évolution dans le bassin versant de la Lokoho afin de pouvoir comparer l'offre et la demande sous divers scénarios et de ressortir des mesures techniques applicables pour une gestion efficace et productive.

Les résultats montrent que les ressources en eau de la Région sont vulnérables au changement climatique et à la croissance démographique. Au rythme actuel, la pénurie d'eau s'installera dans la Région dans une cinquantaine d'années. L'agriculture sera la plus touchée, mais on peut recourir à d'autres sources dont la réutilisation de l'eau ou la désalinisation pour compenser ce manque d'eau.

Mots clés : Modélisation, WEAP21, bassin versant, gestion, ressource, sites de demande, scénario, vulnérabilité, changement climatique.

Abstract :

The present study consists on hydrological modeling using WEAP21 of the watershed of Lokoho (North-eastern of Madagascar) and aims to setting up a system of sustainable and effective management of the water resources to face the risk of water shortage in the area.

The main objective of this study is to model the water resources available, the needs of the sites and their evolution in the watershed of Lokoho in order to be able to compare supply and demand under various scenarios, and to arise from applicable technical measurements for an effective and productive management.

The results show that the water resources of the area are vulnerable to the climate change and to the demographic growth. With actual pace, the water shortage will settle down in the area with ten years. Agriculture will be touched, but one can consider by using other techniques such as the re-use of water or the desalinization to compensate this lack of water.

Key words : Modeling, WEAP21, watershed, management, resource, sites of request, scenario, vulnerability, climate change.

Auteur : ANDRIANARIVONY <i>Andoniaina</i> Tél : 034 63 302 41 Email : andoandrianarivony16@gmail.com	Encadreur : Docteur RALAIMARO <i>Joseph</i> Tél : 034 79 669 91 Email : jhralaimaro@yahoo.com
---	--