



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO**



Département : MINES

Option : GENIE MINERAL

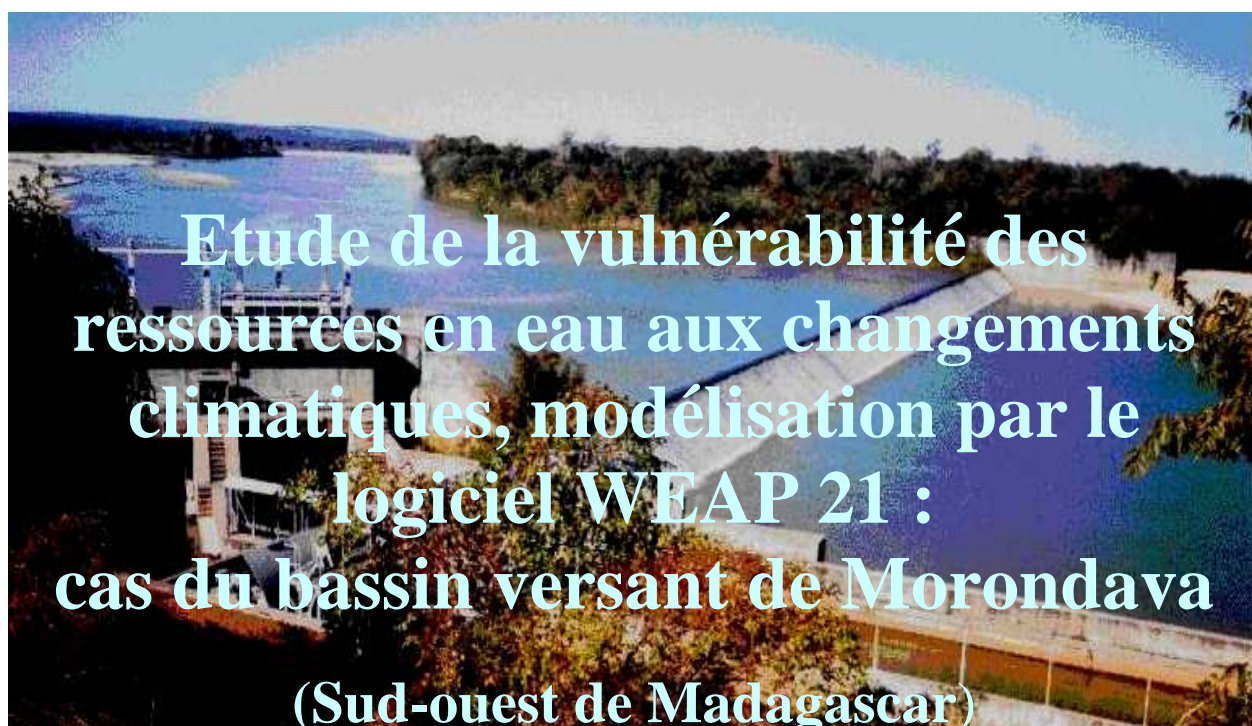
**MEMOIRE DE RECHERCHES**

pour l'obtention du

**DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES**

Spécialisation : HYDROGEOLOGIE

sur :



Présenté par : **Mlle RAKOTONDRABE Felaniaina**

Soutenu le 27 Septembre 2007 devant les membres du jury composés de :

Président : **Pr RANDRIANJA Roger**, Chef de Département Mines, ESPA

Rapporteur : **Dr RALAIMARO Joseph**, Enseignant – Chercheur

Examineurs : **Pr RASOLOMANANA Eddy H.**, Enseignant – Chercheur, ESPA

**Dr ROBISON Laurent R.**, Enseignant – Chercheur

**Dr RAKOTO Heritiana A.**, Enseignant – Chercheur, Faculté des Sciences

Promotion 2005 – 2006

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO**

**Département : MINES**

**Option : GENIE MINERAL**

**MEMOIRE DE RECHERCHES**

**pour l'obtention du**

**DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES**

**Spécialisation : HYDROGEOLOGIE**

**sur :**

**Etude de la vulnérabilité des  
ressources en eau aux changements  
climatiques, modélisation par le  
logiciel WEAP 21 :  
cas du bassin versant de Morondava  
(Sud-ouest de Madagascar)**

**Présenté par : Mlle RAKOTONDRABE Felaniaina**

Soutenu le 27 Septembre 2007 devant les membres du jury composés de :

**Président :** Pr RANDRIANJA Roger, Chef de Département Mines, ESPA

**Rapporteur :** Dr RALAIMARO Joseph, Enseignant – Chercheur

**Examineurs :** Pr RASOLOMANANA Eddy H., Enseignant – Chercheur, ESPA

**Dr ROBISON Laurent R., Enseignant – Chercheur**

**Dr RAKOTO Heritiana A., Enseignant – Chercheur, Faculté des Sciences**

Promotion 2005 – 2006

*A la mémoire de ma Grand-mère  
Un an déjà tu nous as quitté,  
J'aurai aimé que tu sois là à cet instant,  
Mais je sais que là-bas où tu es maintenant tu veilles sur nous  
Je ne t'oublierai jamais.*



# REMERCIEMENTS



« Dieu soit loué, car sans sa bénédiction ce présent mémoire n'a pas pu voir le jour. »

*Ce rapport est le fruit de collaboration de plusieurs personnes, ainsi il m'est agréable de les remercier.*

*Ma gratitude va d'abord à :*

☞ *Monsieur Pierre Hervé RAVELONANDRO, Dcteur du Centre National de Recherche sur l'environnement (CNRE), qui a bien voulu m'accepter en tant que stagiaire*

☞ *Monsieur RAMANANTSIIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA)*

☞ *Monsieur RANDRIANJA Roger, Professeur, Chef de Département Mines à l'ESPA, de me fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire*

☞ *Monsieur RASOLOMANANA Eddy H., Professeur, Chef de Département du DEA en Génie Minéral à l'ESPA, d'accepter de siéger au jury comme examinateur*

☞ *Monsieur RALAIMARO Joseph Hydrogéologue du Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE), notre professeur d'Hydrogéologie, qui a bien voulu m'encadrer et qui à proposer ce thème de mémoire que j'aime beaucoup qu'il trouve ici tous mes*

*Sincères remerciements*

☞ *Monsieur ROBISON Laurent R. Hydrologue du Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE), notre professeur d'Hydrologie depuis 4ème année, aujourd'hui il me fait l'honneur d'être examinateur de ce mémoire*

☞ *Monsieur RAKOTO Heritiana A., Enseignant – Chercheur, Faculté des Sciences, d'avoir accepté de faire partie du jury comme examinateur*

☞ *Tous les enseignants qui nous ont formés durant l'année scolaire*

*Pour terminer, je me dois de remercier ma famille qui m'a toujours encouragé et aidé à suivre le chemin qui me plaisait. Ce Mémoire doit beaucoup à leur soutien tant moral que financier.*

*Merci Dada sy Neny, Miora, Ranto, Diamondra et Volana!*



# SOMMAIRE

INTRODUCTION

**PARTIE I** : PROBLEMES DES RESSOURCES EN EAU :  
VULNERABILITES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

**PARTIE II** : METHODES D'APPROCHE :  
LE LOGICIEL WEAP 21

**PARTIE III** : APPLICATION DU MODELE  
DANS LE BASSIN DE MORONDA

**PARTIE IV** : ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES

**PARTIE V** : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS  
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTES DES FIGURES  
LISTES DES TABLEAUX  
SIGLES ET ABREVIATIONS

# INTRODUCTION

L'eau, or bleu et source de vitalité, est l'un des enjeux majeurs du XXI<sup>ème</sup> siècle, bien que 70% de la surface du globe soient recouvertes d'eau, à peine 25% seulement sont constituées d'eau douce. De ce fait, plus d'un milliard d'habitants de la planète n'ont toujours pas accès à l'eau potable. Si le niveau de consommation actuel se maintient, la moitié de la population mondiale confrontera à des très grandes pénuries d'eau dans les vingt cinq prochaines années. (Revue Photo, 2006). Comme la plupart des pays africains, Madagascar confronte aussi à ce problème, surtout pour la partie Sud de l'Ile. Et d'ailleurs des efforts gouvernementaux ont été déjà pris depuis 1999 ayant pour objectif d'augmenter à 100% le taux d'accès à l'eau potable en milieu urbain et 80% en milieu rural d'ici 2015 (Midi Madagascar, 2002). En outre, les besoins en eau des autres utilisateurs d'eau comme l'agriculture qui utilise 95.6% de prélèvement d'eau (CNEAGR, 2007), l'élevage ainsi que l'industrie, devraient être satisfaits.

En même temps, les ressources en eau commencent à se raréfier pour des multiples raisons : la mauvaise gestion des ressources existantes, le gaspillage dû à l'usage effréné de l'eau, la variation et le changement du climat. Une connaissance des ressources en eau disponible, des besoins des différents usagers et de leur modèle est nécessaire pour mieux gérer l'eau. Mais la gestion ne peut pas être intégrée et durable si on ne tient pas compte à la fois de tous les différents types de ressources en eau et ceci dans leur système de gestion naturel ou leur bassin versant.

Pour cette raison, dans le cadre de la réalisation de la deuxième Communication Nationale sur les changements climatiques et la vulnérabilité des ressources en eau à Madagascar aux changements climatiques actuels, jusqu'aux horizons 2025, 2050, 2100, un travail de recherches intitulé « *Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21 : cas du bassin de Morondava (Sud ouest de Madagascar)* » a été mené.

Le présent rapport comporte cinq parties. Dans la première partie, nous parlerons des différentes ressources en eau, de la vulnérabilité vis-à-vis de la variabilité et du changement climatique puis des impacts majeurs de cette vulnérabilité. En seconde partie, la méthode d'approche proposée pour gérer ces problèmes dont le logiciel WEAP 21. En troisième partie, l'application du modèle dans le bassin versant de Morondava. En quatrième partie l'analyse et traitements des données. Et en cinquième et dernière partie, la présentation des résultats et interprétation avant de conclure et de proposer quelques recommandations sur l'adaptation à ce phénomène de changements climatiques.

**PARTIE I :**

PROBLEMES DES RESSOURCES EN EAU :

VULNERABILITE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'eau est un élément indispensable pour la vie et pour le développement socio-économique réel et durable d'un pays. Il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eau existantes dans le bassin versant surtout les informations concernant :

- les types de ressources en eau locales et leur potentialité
- la vulnérabilité des ressources à un éventuel facteur
- les mesures requises pour développer, gérer et protéger les ressources

## ***1.1. TYPES DE RESSOURCES EN EAU***

Dans la nature, on peut signaler d'une part les petites ressources en eau comme l'humidité de l'air et l'humidité du sol que certains animaux et plantes en profitent. Et d'autre part les grandes ressources d'eau dont :

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

### ***1.1.1. Précipitation ou l'eau de pluie***

Les précipitations sont toutes l'eau météorique qui tombe sur la surface de la terre tant sous forme liquide que sous forme solide. C'est une source primaire d'eau douce. Par des précipitations efficaces, l'eau de pluie alimente à la fois les nappes souterraines par l'infiltration (**I**) et l'eau de surface par le ruissellement (**R**).

Dans certaines régions, la pluie est captée directement pour l'approvisionnement en eau de certains villages par l'impluvium.

La pluie tombée peut être mesurée ou quantifiée à l'aide d'un pluviomètre ou d'une pluviographe à une station d'observations (*Planches photos, Annexe 04 : 4 - c*). Les précipitations exprimées en lame d'eau ou en hauteur de pluie en millimètre indiquent la pluie globale précipitée dans un intervalle de temps (journalière, mensuelle, annuelle) de la région et par unité de surface.

### ***1.1.2. Eau de surfaces***

L'eau de surfaces inclue : les eaux des ruisseaux, des rivières et fleuves, des lacs et marais. Elle provient de l'eau de pluie tombée sur le bassin versant récepteur et (ou) de vidange des nappes souterraines au niveau des sources et suintements.

#### ***1.1.2.1. Eau des fleuves et rivières***

Madagascar dispose plus de 3.000 km environ de fleuves et rivières réparties dans 5 unités hydrologiques ([www.refer.mg/cop/nature/fr/index.htm](http://www.refer.mg/cop/nature/fr/index.htm)). Pour évaluer leurs potentialités on procède



à un jaugeage pour les rivières et fleuves. Les eaux des réseaux de surface peuvent aussi alimenter ou drainer les nappes par le système rivière – eaux souterraines. (Castany, 1982)

### **I.1.2.2. Eau des lacs et marais**

Outre, les marais dont la plupart sont transformés en rizières, plus de 3000 lacs couvrent environ 2000 km<sup>2</sup> (Fleuves et rivières de Madagascar). 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 et biodiversité aquatiques. Ils sont aussi des zones privilégiées de loisirs d'où leur intérêt particulier pour le développement du tourisme. Leurs origines et leurs types nous ont permis de distinguer : les lacs tectoniques, les lacs volcaniques, les lacs des plaines alluviales, les lacs littoraux ou lagunes côtières et les lacs artificiels ou naturels aménagés (Encyclopédie Encarta2004).

La capacité d'un lac peut être estimée par une étude bathymétrique. La quantité stockée s'exprime en volume (m<sup>3</sup>) ou en hauteur d'eau (mm). Les eaux de ces réservoirs peuvent alimenter les nappes souterraines par le système lac – eaux souterraines. Certaines sont des affleurements des nappes d'eau souterraines.

### **I.1.3. Eaux souterraines**

Les eaux souterraines sont constituées par toutes les eaux contenues dans le sol et sous sol. On peut distinguer : les eaux adsorbées, pelliculaires et de rétention, non mobilisables par gravitaire ; les eaux gravifiques ou gravitaires.

Nous ne considérons ici que les eaux mobilisables ou eaux gravitaires qui circulent dans la zone saturée du sous-sol constituant les nappes souterraines et on peut distinguer trois types de nappes, nappe libre, nappe captive, nappe semi-captive.

Ces nappes peuvent être directement exploitées à l'aide des ouvrages de captage hydrogéologique (puits, forages,...) (Castany et al, 1977) ou au niveau des sources par gravitaire.

Pour évaluer leur potentialité, on procède souvent à des tests de productivité aux puits et aux forages appelés essais de pompage soient essai de puits qui est un pompage à courte durée effectué dans un puit ou forages en vue de déterminer ses caractéristiques et en particulier son débit ou pompage d'essai qui est un pompage de longue durée opéré dans un forage pour contrôler l'évolution du débit de l'ouvrage et du rabattement du niveau statique de la nappe (Castany 1998).

La pérennité des nappes peut être caractérisée aussi par des mesures et suivis périodiques de certains paramètres physico-chimiques (niveau piézométrique ou niveau statique, conductivité, ...) des eaux des ouvrages et des points d'eau existants.

## **I.2.VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU**

### **I.2.1. Définition**

D'après Castany en 1982, la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques déterminant la mesure où cette ressource est plus ou moins exposée à la pollution.

Cette définition nous a permis d'avancer que la vulnérabilité des ressources en eau est l'ensemble des différentes sensibilités de ces ressources vis-à-vis d'un certain nombre de facteur. Donc, dans le cas qui nous intéresse, ce sont les formes de sensibilité des ressources en eau vis-à-vis des facteurs anthropiques, physico-chimiques et climatiques.

### **I.2.2. Facteurs de vulnérabilité des ressources en eau**

La vulnérabilité résulte donc de plusieurs facteurs :

- la croissance démographique provoque une augmentation de besoin en eau potable donc de l'exploitation des ressources existantes
- les facteurs anthropiques en particulier les pollutions dues à l'urbanisation, l'industrialisation, l'agriculture,.....
- les facteurs physico - chimique du sol et sous-sol dont la nature lithologique (porosité et perméabilité, la structure et texture de l'aquifère) pour les eaux souterraines.
- les facteurs climatiques surtout la variabilité et le changement du climat avec une faible ou forte pluviosité (cyclone, inondation, sécheresse) ou une forte évapotranspiration, ...

Dans ce mémoire, nous penserons aux facteurs climatiques en particulier les changements climatiques comme facteur de vulnérabilité des ressources en eau.

### **I.2.3. Variabilité et changements climatiques**

#### **I.2.3.1. Climat**

Ethymologiquement, le terme climat vient du mot grec « *Klima* » qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la Terre. Cette définition souligne le rôle moteur que joue la radiation solaire qui plonge la Terre dans un flux de chaleur et de lumière ([//education.france5.fr/climat/ressentir\\_climat.htm](http://education.france5.fr/climat/ressentir_climat.htm)).

Pour les climatologues, le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui se produisent sur un lieu dans leur succession habituelle.

La détermination d'un climat repose sur une analyse du temps qu'il a fait chaque jour durant une longue période, en général trente années consécutives. Elle s'appuie sur les valeurs fournies par la météorologie pour caractériser les états de l'atmosphère : la température de l'air, la lame d'eau

précipitée, la durée de l'insolation, la direction du vent. Malgré le caractère fugace du temps, des situations semblables se répètent et peuvent être groupées en famille.

La durée et la fréquence annuelle des types de temps, leur rythme saisonnier permettent de décrire plusieurs types de climats: tropical, tempéré, aride ou semi-aride. (Encyclopédie Encarta, 2004).

### **I.2.3.2. Changements climatiques**

Il y a des changements climatiques quand l'équilibre entre le rythme auquel l'énergie entre dans le système climatique de la Terre et celui où elle en sort est perturbé par des variations d'un ou plusieurs de ses principaux éléments météorologiques (pluviosité, évapotranspiration, humidité, température...) (<http://www.cc.gc.ca>).

### **I.2.3.3. Origine des changements climatiques :**

Les principales causes des changements sont tous les facteurs pouvant provoquer l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette augmentation de la concentration engendre la destruction de la couche d'ozone qui entraîne des modifications de l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre d'où le réchauffement de la Terre ([http://www.ec.gc.ca/Adaptation-nrcan.gc.ca/perspective/water\\_1\\_f.php](http://www.ec.gc.ca/Adaptation-nrcan.gc.ca/perspective/water_1_f.php)). Ce phénomène de réchauffement lié au problème de couches d'ozone dû à l'énorme production mondiale de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) de la terre influe sur les différents facteurs climatiques (température, vent,...) et sur les différents termes du bilan hydrique [Évapotranspiration (ETP/ETR), Précipitation (P), Ruissellement (R), Infiltration (I)].

On peut citer à titre d'exemples :

- les variations de la teneur en aérosols
- la pollution de l'air due à la circulation automobile, les industries, les feux de brousse, les bois de chauffe, les déchets,...
- les changements de la réflectivité de la surface de la Terre.

Quelques indices de vulnérabilité des ressources en eau sont observées actuellement.

## ***I.2.4. Indices de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques***

Les changements climatiques portent atteinte sur les caractéristiques physico-chimiques (quantité et qualité) des ressources en eau que ce soit eau de surface ou eaux souterraines.

### **I.2.4.1. Dégradation de la quantité des ressources en eau**

#### ***i. Faible ou forte pluviosité***

La perturbation du régime pluviométrique (variation de la pluviométrie moyenne, nombre de jours de pluie, ...) se manifeste dans l'espace et dans le temps. Il y a repartitions inégales et (ou)

diminutions de la pluviométrie mensuelle ou annuelle. Ce qui provoque des impacts sur le régime hydrologique aussi bien de surface que souterrain.

### ***ii. Forte évaporation***

Une augmentation de température à cause du réchauffement de l'atmosphère engendrera une variation de la valeur des différents termes du bilan hydrique : nouvelle répartition temporelle et spatiale des précipitations et des écoulements, faible infiltration, intensification de l'évapotranspiration qui conduira à un assèchement ou tarissement des points d'eau naturels (lacs, marais, rivière, ruisseau, source, ... (Min Env., 2000).

### ***iii. Tarissement des rivières, ruisseaux et sources***

La variation des précipitations et de température pourrait faire baisser les niveaux d'eau dans le bassin et rivières. La saison de pluie devient de plus en plus irrégulière et de moins en moins pluvieuse qui pourrait entraîner le tarissement des points d'eau.

Ce changement peut influencer sur la variation du niveau marin qui, par le déplacement de l'interface eau douce et eau salée (Min Env., 2000), diminue la disponibilité en eau de qualité le long du littoral.

## **I.2.4.2. Dégradation de la qualité des ressources en eau**

### ***i. Effets de la forte évaporation***

Sous l'effet de la forte évaporation, il peut y avoir une augmentation de la teneur en sel des points d'eau ou une tendance à un accroissement de la concentration en polluants dans l'eau. En outre, l'élévation des températures entraînerait une hausse de température de l'eau qui se met en équilibre avec le milieu. Ce changement pourrait contribuer à réduire la concentration d'oxygène dissous, à accroître les concentrations des nutriments comme les phosphores et à donner à l'eau un goût et une odeur désagréable pendant la saison chaude.

Le changement climatique pourrait également dégrader la qualité d'eau souterraine. Il peut y avoir intrusion d'eau salée ou montée du niveau marin (*Planches photos, annexe 04 :1- d, 3 - b*) et infiltration dans les aquifères des régions côtières ([www.cc.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f\\_FSA9.htm](http://www.cc.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f_FSA9.htm)).

### ***ii. Effets des crues***

L'augmentation des débits et la fréquence des inondations accentuent la turbidité de l'eau, l'érosion et le lavage chimique des sols (sédimentation ou ensablement, différentes formes d'érosions). Les précipitations intenses augmentent le risque de propagation ou de dispersion des rejets contaminants (déchets urbains, animaux, ...) et des maladies d'origine hydrique.

Par ailleurs, on pourra avoir aussi une destruction des infrastructures à cause d'un fort débit dû à un cyclone (cas du pont Poamay qui relie Malaimbandy – Morondava), inondation de la ville ou des infrastructures scolaires (*Planches photos, annexes 04 : 1 – a, b, c, e.*).

### **iii. Pollutions**

Une ressource en eau est dite polluée lorsqu'elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où qu'elle présente un danger pour l'environnement.

La pollution est un problème mondial. Elle est définie comme la souillure ou l'infection due aux activités humaines. La pollution tellurique ou naturelle constitue aussi une base de discussions ces derniers temps.

A Madagascar, le problème de la pollution des eaux commence à devenir de plus en plus préoccupant. Les sources majeures sont les rejets polluants (Bontoux, 1993) liquides (eaux usées), solides (ordures et déchets divers) et gazeux (fumée) d'origines divers :

- domestiques (égouts ménagers)
- industrielles (eaux usées et déchets industriels)
- eaux usées urbaines (ordures municipales)
- rejets polluants agricoles (intrants)
- apport des dépôts ou décharges de déchets solides
- apports liés à la pollution atmosphérique
- rejets polluants des élevages
- rejets polluants des exploitations minières (intrants)

La pollution peut toucher tous les types de ressources en eau (aussi bien l'eau de pluie, l'eau souterraine, l'eau de surface).

#### **- Contamination des eaux de surface**

L'eau est un véhicule de transport de substance minérale, organique ou bactérienne idéale. Pour l'eau de surface, la contamination peut se faire par :

- déversement direct des rejets polluants dans les réseaux et réservoirs de surface
- transport et infiltrations des eaux de ruissellement en surface du sol en présence d'une précipitation efficace et mauvais assainissements.
- vidange des nappes polluées

#### **- Contamination des eaux souterraines**

Les sources de pollution et les principaux contaminants sont les mêmes que celles des eaux de surface. La différence réside sur le mode de contamination. En présence des précipitations et infiltrations efficaces, la partie infiltrée véhicule les polluants dans le sol et sous sol en franchissant quelques obstacles avant d'atteindre l'aquifère (Lecompte, 1995, Castany, 1998) :

- introduction des pollutions dans le sol et sous sol à la zone d'impact ou foyer de pollution

- immigration et évolution du polluant en zone non saturée vers la zone saturée pendant laquelle il peut y avoir autoépuration
- propagation et évolution du polluant dans l'aquifère.

#### ***- Contamination des eaux de pluie***

L'eau de pluie est actuellement polluée aussi on peut avoir des pluies acides, pluie polluée par les poussières nucléaires ([www.eau-de-pluie.com](http://www.eau-de-pluie.com)).

Les pluies acides se forment lorsque les oxydes de soufre et d'azote s'associent à l'humidité de l'air pour libérer de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique qui est ensuite transportés très loin de leur source avant d'être précipités par les pluies. Ils résultent de la combinaison des émissions d'origine industrielle avec l'humidité atmosphérique. Les polluants peuvent être transportés sur de longues distances avant de tomber au sol ; ainsi, des forêts et des lacs peuvent être attaqués par des pluies acides même s'ils se trouvent loin des régions industrielles. À proximité des usines, des dégâts supplémentaires sont dus à la chute des plus grosses particules polluantes qui tombent en pluie sèche (Encyclopédie Encarta 2004).

### ***1.3. SOLUTIONS PROPOSEES***

La gestion intégrée des ressources en eau nécessite la connaissance de la situation actuelle et à venir des ressources existantes. Pour cette raison, on a choisi comme méthode d'approche le modèle WEAP 21 ou Water Evaluation And Planning System pour modéliser les ressources et les besoins en eau en vue de la gestion intégrée et durable des ressources en eau dans un bassin versant donné.

## PARTIE II

METHODE D'APPROCHE, LE LOGICIEL



Water Evaluation And Planning System

Si le logiciel HYDROM est employé par les institutions travaillant sur les eaux de surface permettent d'évaluer les ressources en eau de surface tel que les CNRE (Centre National de Recherche Environnemental et le Service Météorologique, le PLUVIOM pour évaluer les précipitations. Et que certains modèles comme MODE-FLOW, GWW (Grounds Water Windows), AQUACHEM sont utilisés pour l'eau souterraine.

Le logiciel WEAP est utilisé pour la planification de l'exploitation de toutes les ressources en eau que ce soit eau de pluie, eau de surface ou eau souterraine. C'est un logiciel de modélisation hydrologique pour la gestion intégrée et durable des ressources en eau.

## **II.1. DESCRIPTION DU LOGICIEL**

Le WEAP est déjà utilisé dans divers pays, y compris les Etats-Unis, le Mexique, le Brésil, l'Allemagne, le Ghana, le Burkina Faso, le Kenya, l'Afrique du Sud, la Mozambique, l'Egypte, l'Israël, l'Oman, l'Asie centrale, le Sri Lanka, l'Inde, le Népal, la Chine, la Corée du Sud, et la Thaïlande (Planches photos, Annexe 04 : 1, carte d'utilisation de WEAP).

WEAP ou « Water Evaluation and planning System » est créé par Stockholm Environment Institute (SEI) à Tellus Institute 11 Arlington Street, Boston, MA U2116-3411 USA par les chercheurs : Jack Seiber, Water Systems Modeler ; Chris Swartz , Research Associate et Annette Huber – Lee, Director Water Program Stockholm Environment Institute.

### **II.1.1. Principaux objectifs du logiciel**

WEAP place l'évaluation des problèmes spécifiques de l'eau dans un cadre global. Il intègre plusieurs dimensions : entre les besoins et l'approvisionnement, entre la quantité et la qualité de l'eau, et entre les objectifs de développement économique et les contraintes environnementales.

Les objectifs de ce système d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP) sont :

- d'incorporer ces dimensions dans un outil pratique pour des ressources d'eau avec la projection future
- d'examiner des stratégies alternatives de développement et de gestion de l'eau
- de fournir un système de base de données pour la demande ou besoin en eau et les informations de maintien d'approvisionnement
- de prévoir certaines situations des ressources en eau en simulant la demande, les ressources exploitables, les écoulements et stockage, et les sources de pollutions, les traitements et décharges
- d'analyser le développement socio-économique en évaluant une gamme complète des options de développement et de gestion de l'eau, et en tenant compte des utilisations multiples et concurrentes des systèmes aquatiques.

Pour atteindre ces objectifs, il faut avoir le modèle.



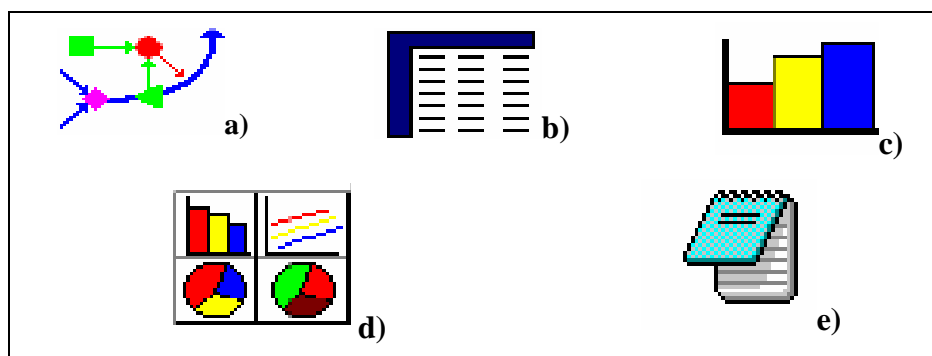
## II.1.2. Acquisition du logiciel

Le logiciel WEAP est téléchargeable sur site : <http://www.weap21.org>. Il est fonctionnel excepté que le dispositif «économiser données » est handicapé. Une version Démo du logiciel est accessible à tout le monde. Par contre, pour le fonctionnel, il faut obtenir un permis ou licence d'utilisation pour les types d'utilisateur. Pour l'obtention, il faut remplir et envoyer un formulaire. L'SEI (Stockholm Environment Institute) envoie par e-mail le nom d'utilisateur et un code d'enregistrement, les instructions pour activer le logiciel WEAP et pour permettre le dispositif "économiser données" fonctionnel. Il est préférable que l'ordinateur soit relié à l'Internet car le WEAP a un forum d'utilisateur sur le site <http://forums.seib.org/weap>. Il faut un pseudo et un mot de passe pour entrer dans ce forum. Le forum peut aider l'utilisateur pendant la mise en marche du logiciel, le traitement de données et la mise à jour du logiciel. Le permis d'utilisation est valide pour une durée déterminée.

A noter que l'IES peut publier des travaux de modélisation sous WEAP et souhaite avoir une version de la présente modélisation.

## II.1.3. Structure du Logiciel

WEAP se possède cinq présentations principales : représentation cartographique et graphique, affichage des données et des résultats, présentation des notes et observations. Ces affichages sont présentés par des icônes graphiques sur la "barre d'affichage" située à côté gauche de l'écran. En cliquant sur l'une de ces icônes, une présentation voulue est affichée. Ces cinq affichages sont présentés ci-dessous (Fig.1, a, b, c, d, e).

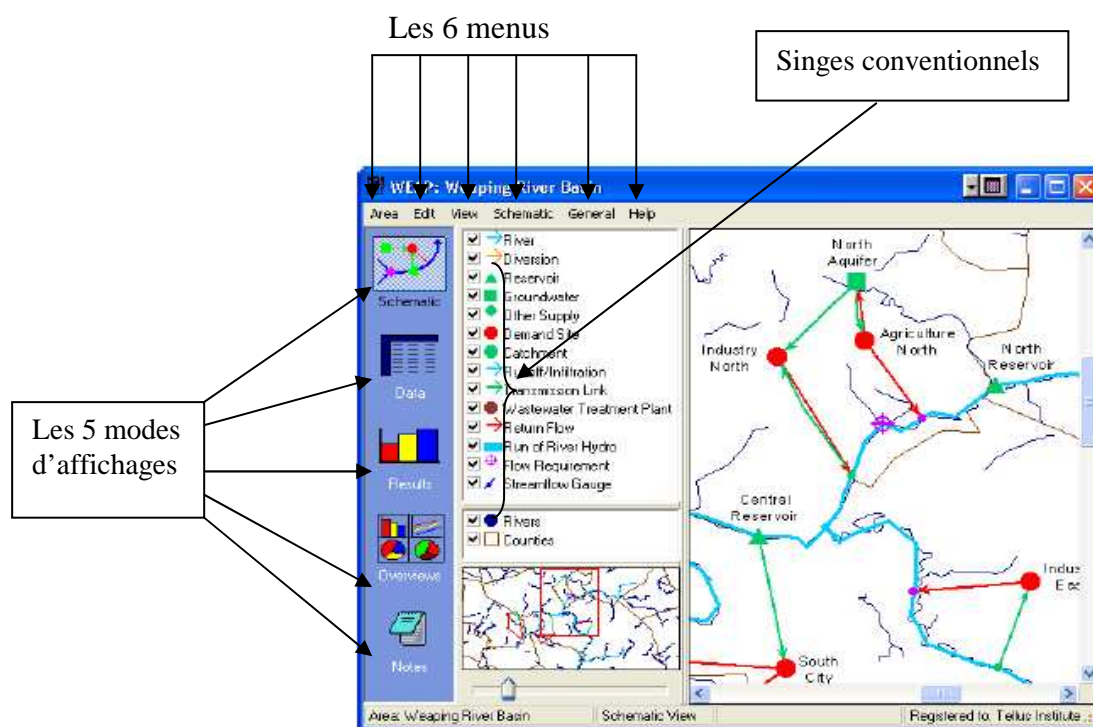


**Fig. 1:** Les cinq affichages du Modèle Weap

### II.1.3.1. Cartographie

C'est le point de commencement pour toutes les activités dans WEAP (Fig.1a). Elle sert à créer, éditer ou aussi ajouter des couches ArcView ou d'autres SIG standard de la zone d'étude comme couche de fond. Ainsi, on peut accéder rapidement à l'analyse des données et à l'affichage des résultats pour n'importe quel noeud en cliquant sur l'objet qui nous intéresse.

Les objets sont montrés dans la 2<sup>ème</sup> fenêtre gauche avec les signes conventionnels utilisés (Fig.2.).



**Fig. 2 : Fenêtre cartographique WEAP**

### II.1.3.2. Base de données

C'est l'endroit pour la création des structures, du modèle et des suppositions de données (Fig.1b). Pour l'affichage des données, l'écran est divisé en quatre carreaux (Fig.3) :

*i. Sur la partie supérieure*, un lien hiérarchique (menu lien) est employé pour créer et organiser des structures de données dans six suppositions principales (1) : principale clé, sites de demandes, hydrologie, approvisionnement et ressources, qualité de l'eau et d'autres suppositions.

Par exemple, cliquer sur « site de demande » la branche lien du côté gauche de l'écran, les données pour tous les emplacements de demande apparaissent sur le côté droit de l'écran.

*ii. Sur la gauche inférieure*, un schéma du secteur apparaît. En cliquant sur l'élément qui apparaît sur le schéma, il sera accentué dans le lien et des données seront montrées dans les tables de saisie de données vers la droite (2). Quand on clique sur une branche dans le lien, l'élément associé clignotera brièvement.

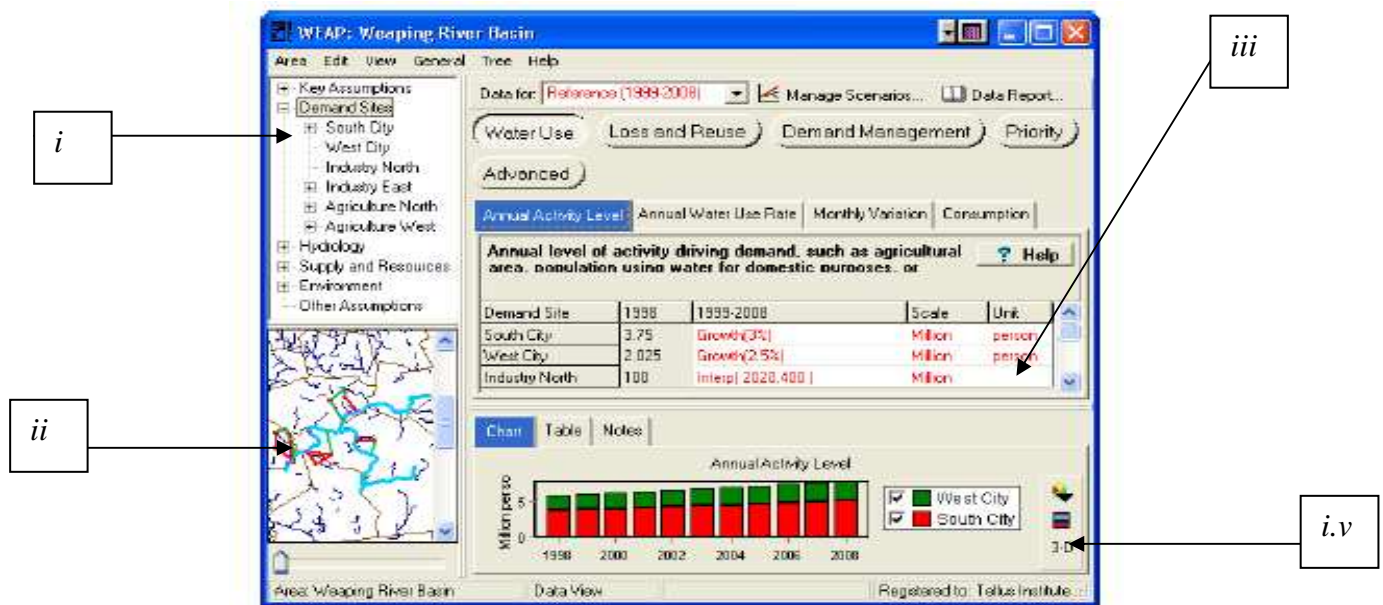
*iii. Sur la partie droite supérieure*, une table de saisie de données apparaît. Cette table sert à écrire les expressions qui définissent les comptes courants (3), pour éditer des données et pour créer le modèle des rapports.

Au-dessus de ce tableau de saisie de données, il y a un ensemble de boutons donnant l'accès aux différentes catégories de variables liées à chaque branche.

iv. Au dessus tableau de saisie de données, un cadre de résultats apparaît, il représente graphiquement les données saisies dans la table de saisie de données.

Sur le coté droit, il y a un barre d'outil pour changer la forme du diagramme (couleurs, effets 3D, grilles, nombre de positions décimales, etc...)

Les données numériques peuvent être transféré directement dans Microsoft excel.



**Fig. 3a: Fenêtre basse de données**

### II.1.3.3. Présentation des résultats

C'est le menu qui permet d'afficher de façon détaillé et flexible toutes les sortes de modèles (Fig. 1c), dans les diagrammes, les tables et le menu schéma. Cette présentation peut montrer une grande variété de diagrammes et de tables couvrant chaque aspect du système : demandes, approvisionnement et chargements environnementaux.

Les résultats peuvent être exportés dans l'Excel

### II.1.3.4. Représentation graphique

La représentation graphique (Fig. 1d) est employée pour grouper l'ensemble des diagrammes "Favoris" et les tables (créés dans le menu résultat). Avec cette représentation, on peut examiner simultanément les différents aspects importants du système, tels que les demandes, le niveau de stockage, .... Les graphes peuvent être copiés dans Word.

### II.1.3.5. Bloc Notes

L'écran de notes est un outil simple de traitement de texte (Fig. 1e) avec lequel on peut écrire des informations documentaires et des références pour chaque branche du lien. On peut importer les notes vers le texte (Microsoft Word).

## **II.2. FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL**

WEAP fonctionne donc suivant cinq (5) étapes.

### **II.2.1. Créer une zone d'étude**

Dans cette partie, il s'agit de créer une carte de la zone d'étude. On peut utiliser des cartes traitées avec des logiciels de traitement cartographique (SIG) en particulier ArcWiev. Cette carte va servir comme fond des dessins des éléments nécessaires pour pouvoir faire la simulation tels que : les emplacements urbains, les rivières, les sources d'eaux souterraines, les réservoirs, les barrages les industries, les sites agricultures et les autres types d'emplacement selon l'étude.

### **II.2.2. Créer les hypothèses clés et références**

Puisque le logiciel pourrait faire une simulation basée sur le calcul de la demande et l'approvisionnement en eau, l'écoulement, l'infiltration, le stockage, et le traitement général de pollution, la qualité de l'eau, etc.... Il est donc primordial de créer la base de données avec les différentes hypothèses clés et les différents scénarii.

#### **II.2.2.1. Hypothèses clés**

Ce sont des variables définies par l'utilisateur du logiciel qui servent de clés principales pour faire l'analyse. Dans notre étude, nous avons quatre (4) hypothèses clés servant comme données de base pour le logiciel utilisation d'eau domestique, besoins en eau pour l'irrigation, pourcentage mensuel d'utilisation d'eau domestique, taux de croissance de la population pour l'année du scénario futur.

#### **II.2.2.2. Références**

Il est nécessaire d'avoir une année ou une période de référence pour servir de modèle. Toutes les données à utiliser doivent être comprises entre cette année ou période de référence.

### **II.2.3. Proposer des Scénarios**

Dans WEAP, le scénario typique est composé de trois étapes une année de compte courant choisie comme année de référence du modèle dont on ajoute les données ou une période, un scénario de référence établi à partir du compte courant et sert pour simuler l'évolution, probable du système sans interposition, des autres scénarii pour évaluer les effets des changements socio-économiques, changements climatiques probables pour l'année ou projet futur.

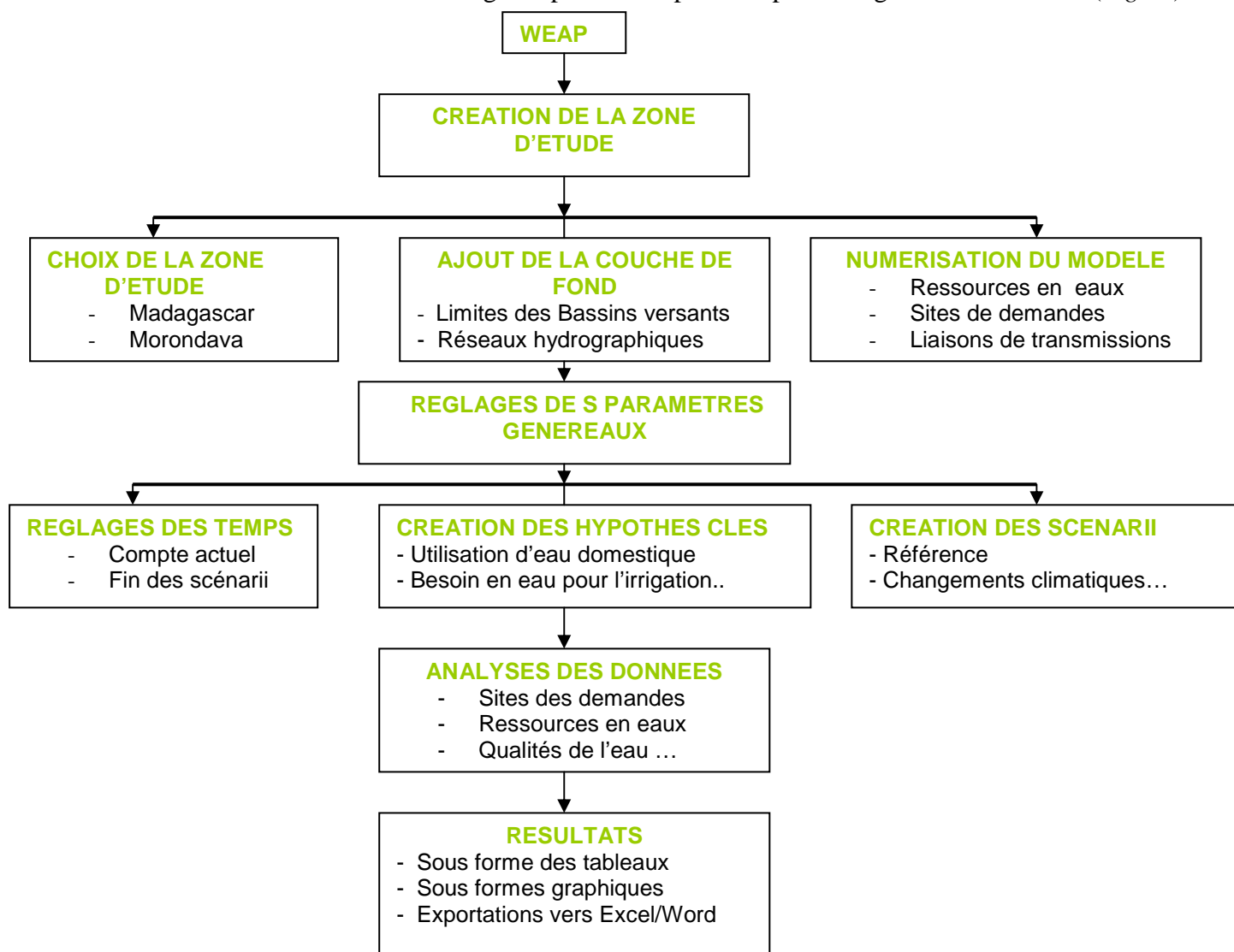
### **II.2.4. Saisir les données**

Les données sont à saisir en cliquant droite après avoir créer les éléments dans la zones d'études (placer les emplacements urbains, industriels, élevages,.....) ou en passant dans le menu d'affichage de la base de données.

## II.2.5. Présenter les résultats

Les résultats se présentent sous forme de graphe et (ou) de tableau. On aura deux résultats à comparer : les résultats de l'année de référence et de l'année de scénario de changements climatiques.

Le fonctionnement du logiciel peut être représenté par le diagramme ci-dessous (Fig.3b).



**Fig.3b** : Organigramme du fonctionnement du logiciel

## II.3. DONNEES NECESSAIRES

Les données sont différentes suivant l'étude que l'on veut procéder.

### II.3.1. Etude de l'offre et de la demande en eau

Pour l'étude de l'offre et de la demande ou l'étude de l'approvisionnement en eau, les principales données nécessaires sont la quantité d'eau domestique utilisée, la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation, la quantité d'eau utilisée pour l'élevage, les nombres ou effectifs d'utilisateurs (population, bétails, ...), la surface cultivée, les précipitations, l'évapotranspiration, les débits.

Ces données supposées englobant d'une part, les ressources en eau et d'autre part, les principaux usagers de l'eau, nous permettent de faire une modélisation simple de la gestion de l'eau, l'établissement des priorités à l'attribution de demande. La prise en compte des données sur les autres utilisateurs comme l'industrie, l'exploitation minière, le tourisme et autres rend la modélisation plus proche de la réalité.

### **II.3.2. Etude de la qualité de l'eau**

Dans cette étude, on peut modéliser les polluants en les classant en deux types : polluants conservateurs et polluants non conservateurs.

Un polluant est dit conservateur s'il n'y a aucun affaiblissement de ses constituants. Par contre, il est non conservateur si ses constituants se délabrent selon une fonction d'affaiblissement exponentielle. Quand on fait la modélisation de ce polluant, on saisit aussi les données sur le taux quotidien d'affaiblissement de l'élément polluant à modéliser. Les polluants conservateurs sont modélisés par un bilan de matières simples ou constituants chimiques de l'eau. Par contre, plusieurs modèles peuvent être offerts pour les polluants non conservateurs.

Le modèle nécessite des données entrantes sur la qualité de l'eau (surface et souterraines), des données sur la pollution pour l'emplacement de la demande (eaux usées domestiques), des données sur les eaux usées par des usines et eaux résiduaires.

### **II.3.3. Etude hydrologique**

Dans ce module, WEAP permet de faire :

- la modélisation de captage par le modèle d'écoulement et de précipitations ou par le modèle d'humidité du sol
- la simulation sur l'interaction d'eau de surface - eaux souterraines

Les données nécessaires sont surtout des données climatiques comme l'évapotranspiration potentielle ou réelle (ETP/ETR), précipitations (P), écoulement (R) ou débit (Q), humidité (H), infiltration (I).

A noter que dans le logiciel, il existe déjà un modèle nommé « *Méthode de l'année hydrologique* » qui permet de faire une simulation de l'effet du changement climatique sur les ressources en eau.

### **II.3.4. Etudes hydro-électriques**

WEAP peut modéliser aussi la production d'énergie mais dans la zone d'étude nous n'avons pas recensé aucun usage hydro-électrique.

**PARTIE III :**

APPLICATION DU MODELE

DANS LE BASSIN VERSANT DE MORONDAVA

Le Bassin de Morondava a été choisi pour appliquer le « modèle WEAP 21 » pour des multiples raisons :

- sa vulnérabilité aux changements climatiques
- la présence des activités socio-économiques intenses dépendantes directement ou indirectement aux ressources en eaux (agricultures, élevages, industries, tourisms, .....)
- la disponibilité des données concernant les ressources en eau
- la disponibilité des documents ou ouvrages de recherches ultérieures.

### **III.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE**

#### **III.1.1. Localisation**

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire de Morondava (*Fig. 4*). Il se trouve dans la Région de Menabe,

Elle est limitée:

- à l'Ouest la mer Canal de Mozambique
- Au Nord le bassin versant de Tandila / Andranomena
- au Sud par le bassin versant de Maharivo
- à l'Est par le bassin versant de Tsiribihina

Le bassin versant de Morondava couvre une superficie de 6201.92 km<sup>2</sup>.

Du point de vue géomorphologique, le bassin s'oriente suivant une direction générale Nord Sud. D'Est en Ouest, il est formé par :

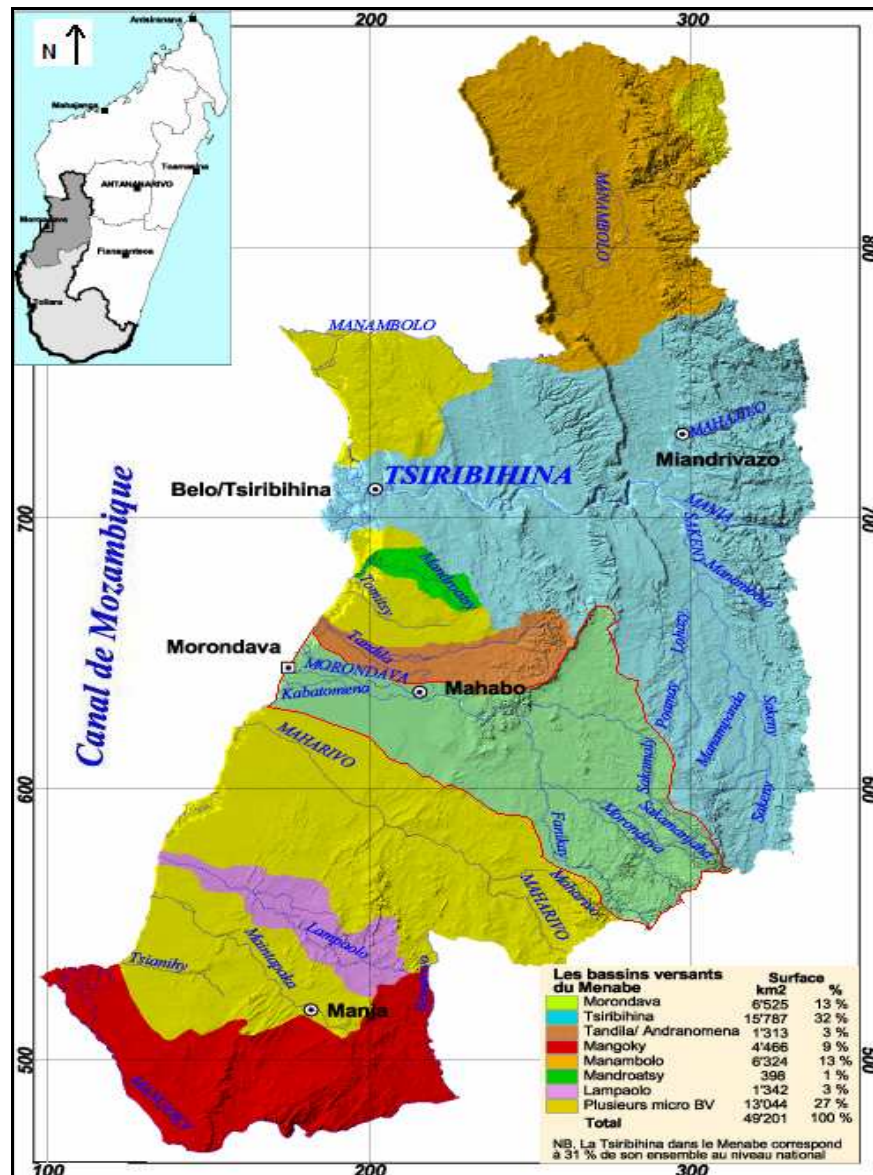
- la grande dépression gréseuse de Betsiriry bordée à l'est par le domaine du socle du Moyen Ouest
- le plateau ruiniforme continental gréseux de Makay et d'Isalo
- les vastes plateaux gréseux au nord dont le plateau de Tsiandava au nord d'Ankilizato ou le plateau calcaire éocène souvent recouverts par de la carapace sableuse ou sablo-argileuse rouge ou par des placages sableux côtiers d'épaisseur variée de 1 à 10m
- les zones de mangrove, des tannes et des dunes.

#### **III.1.2. Divisions administratives touchées par l'étude :**

Le bassin couvre deux Districts :

- Morondava avec quatre (4) communes : Morondava, Bemanonga, Analaiva et Androvabe.
- Mahabo avec sept (7) communes : Mahabo, Ampanihy, Ankilizato, Ambia, Malaimbandy, Beronono et Tsimazava.





Source : BD 100 FTM

**Fig. 4** : Carte de localisation du bassin de Morondava et ses environs

## III.2. CONTEXTES PHYSIQUES

### III.2.1. Contexte climatique

Le bassin versant de Morondava fait partie de la région à climat tropical subhumide à faciès continental chaud et pluvieux du versant occidental.

On peut distinguer deux saisons climatiques nettement remarquables :

- une saison chaude et pluvieuse, de novembre à avril
- une saison moins chaude et très sèche, de mai à octobre.

### III.2.1.1. Température

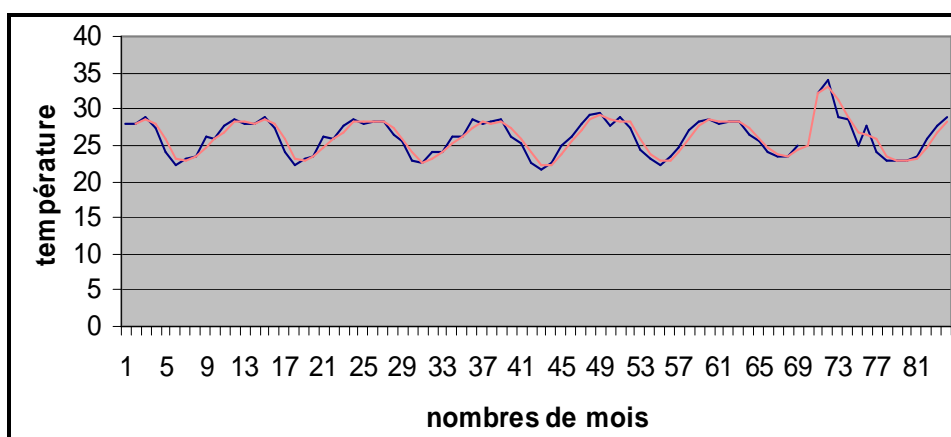
Les températures moyennes annuelles enregistrées sont : maximale 32°C, minimale 11°C et la température moyenne est de 23°C. La température maximale est observée au mois de décembre à mars. On constate que les mois les plus chauds correspondent aux mois les plus pluvieux, le mois froid au mois de Juillet.

Les données sont représentées par le tableau ci-dessous pour la période de 2000-2006 avec la courbe de variation (Fig. 5).

**Tab. 1: Température moyenne mensuelle (C°) (2000-2006)**

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Températures moyennes mensuelles (en °C) Morondava log E: 44° 18' Lat S: 20° 16' Alt: 8m											
2000	28.1	28.1	28.8	27.4	24.1	22.3	23.3	23.4	26.2	25.8	27.8	28.5
2001	28.1	28.1	28.8	27.4	24.1	22.3	23.3	23.4	26.2	25.8	27.8	28.5
2002	28	28.25	28.35	26.45	25.45	22.85	22.5	23.95	24.2	26.3	26.05	28.7
2003	27.9	28.2	28.45	26.25	25.23	22.65	21.75	22.55	25.05	26.3	28.1	29.05
2004	29.35	27.8	28.8	27.45	24.5	23.25	22.25	23.4	24.8	26.95	28.3	28.55
2005	27.95	28.4	28.3	26.4	25.45	24.05	23.5	23.5	25.05	25	32.3	33.9
2006	28.95	28.55	25	27.7	24.15	22.85	22.85	22.85	23.45	25.85	27.55	28.85

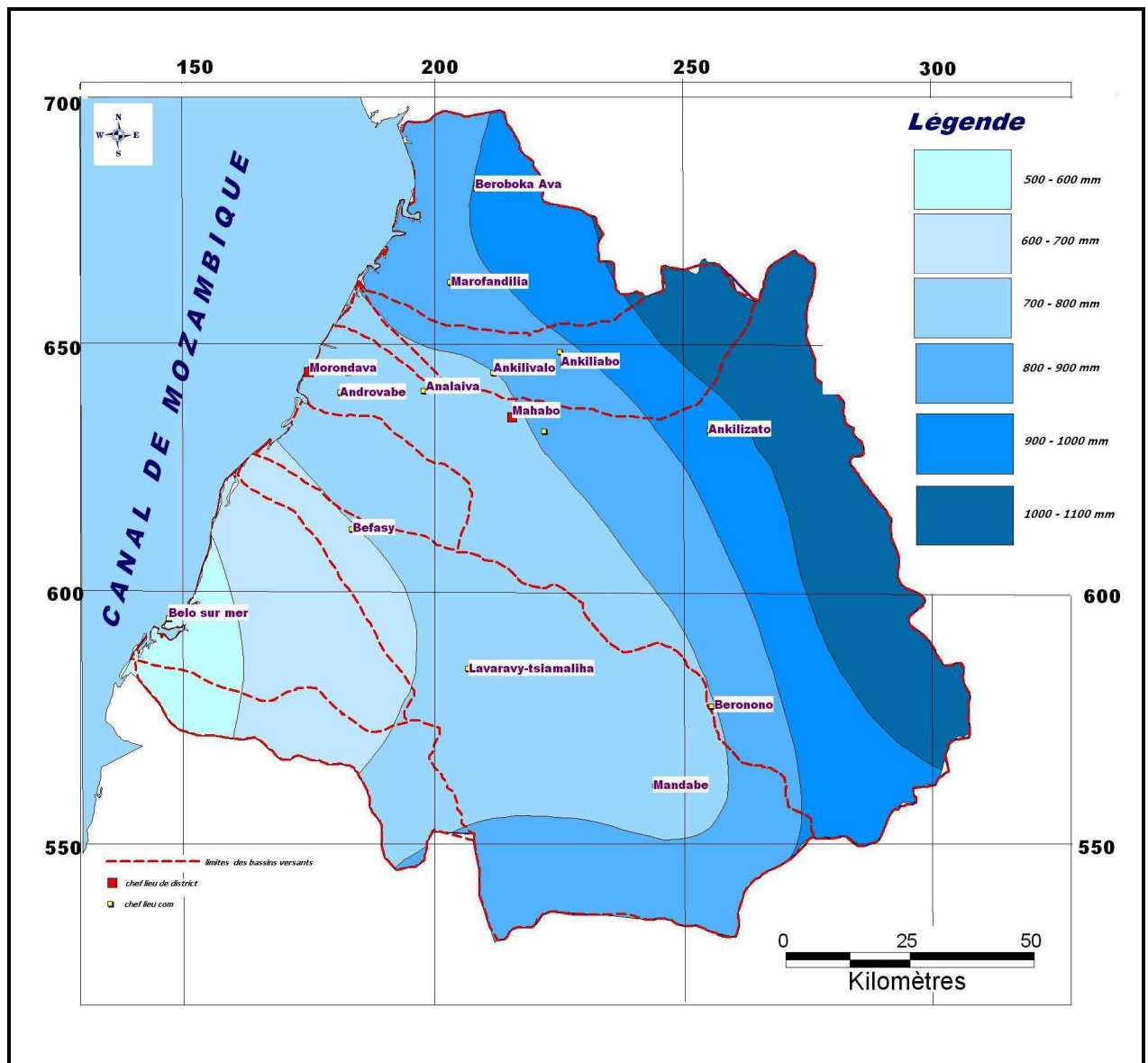
Source : Service Météorologique Ampandrinomby



**Fig. 5 : Courbe de l'évolution des températures avec le courbe de tendance**

### III.2.1.2. Pluviométrie

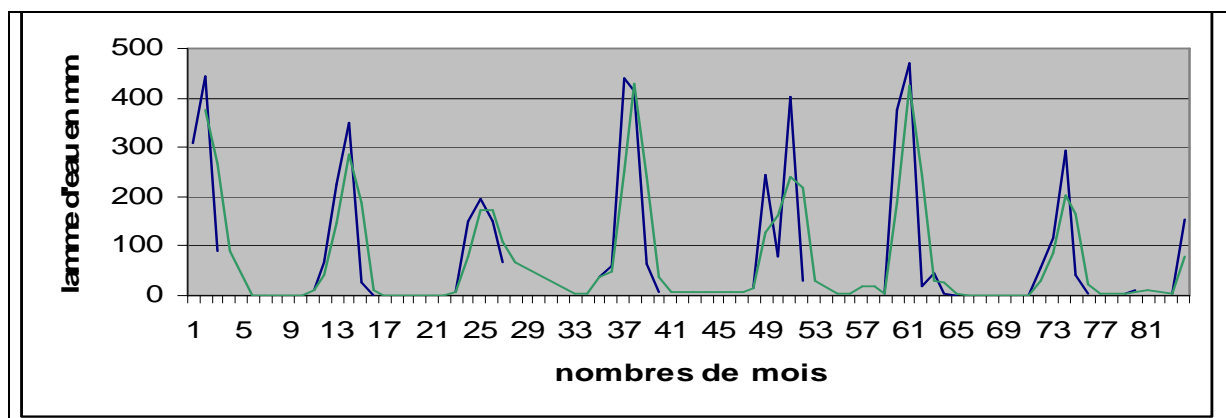
La pluviométrie annuelle est très faible (d'après carte isohyète) irrégulière et assez mal répartie dans l'espace. Elle devient un facteur limitant des activités agricoles car la saison de pluie se concentre entre le mois de novembre et le mois de mars, tandis que la période sèche s'étale sur 07 mois (de mois d'avril au mois d'octobre) (Fig. 6).



Source : BD 500 FTM

**Fig. 6 : Carte isohyètes du Bassin de Morondava et ses alentours**

Les pluviométries moyennes mensuelles entre de 2000 à 2006 des stations météorologiques dans la zone d'étude sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 2) et la figure (Fig. 6) ci-dessous.



**Fig. 7: Courbe de l'évolution des précipitations mensuelles avec le courbe de tendance**

La courbe indique les années humides qui correspondent à des lames d'eau aux environs de 400 à 450 mm/an et les périodes sèches aux alentours de 200 mm de lame d'eau /an

**Tab. 2: Evolutions des précipitations moyennes mensuelles (2000-2006)**

Morondava Log E: 44° 18' Lat S: 20° 16' Alt: 8m

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	Précipitations moyennes mensuelles (mm)											
2000	307.3	442.7	89.6	00	00	1.8	00	00	0.2	00	12.6	69.2
2001	227	347.9	24.9	0.5	00	00	00	00	0.1	00	9.3	152.1
2002	195.3	151.9	69.5	00	00	00	00	00	4	00	38.5	59.1
2003	441.6	413.4	65.3	7.8	00	00	8.9	00	00	8.1	00	15.2
2004	242.7	77.7	402	31	00	00	4.3	00	19	00	3	375.9
2005	471.8	17.4	44.9	5	1.1	00	00	00	00	00	1.8	54.8
2006	114.9	291.7	39.9	2.6	00	00	3.8	10	00	00	4.8	155.1

*Source : Service Météorologique Ampandrinomby -Antananarivo*

### III.2.1.3. Vents

Le vent marin chargé d'humidité souffle vers l'intérieur de la terre, est arrêté par le massif de Bongolava, à l'Est de la région. Ceci explique l'humidité optimale plus ou moins persistante de l'Ouest de la région alors que la région est reconnue semi-aride.

En septembre - octobre, un vent desséchant souffle. Ce vent influe sur le débit de la rivière et le niveau des nappes phréatiques.

En haute mer, on note l'existence de vent périodique qui, en saison de pluie, souffle du Nord vers le Sud et agite considérablement la mer. Actuellement, la mer envahit la ville de Morondava en haute marée d'équinoxe (*Planches photos, Annexe 0 : 1 - d*). Le fait inverse se produit en saison sèche, la mer est calme dans la plupart du temps.

Le tableau ci-dessous (*Tab.3*) résume quelques données climatiques de la Région.

**Tab. 3: Résumés des données climatiques normales de 30 ans (1971 - 2000)**

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Pluie mm	278.3	210.7	90.3	18.7	4.5	1.6	1.7	0.7	2.7	8.1	26.5	122.4
Nb jour	15	13	8	2	1	1	1	-	1	2	3	9
Humidité	80	82	81	79	77	74	74	74	76	76	75	78
Flux max j m/s	2.5	2.5	2.0	2.0	1.7	2.0	2.2	2.5	2.8	3.1	2.8	2.8

*Source : Service Météorologique Ampandrianomby - Antananarivo*

### III.2.1.4. Cyclones

La région est touchée par le cyclone avec une probabilité supérieure à 0,5 (soit une chance sur deux) ou du moins influencée par une perturbation tropicale, surtout par les perturbations se formant dans le canal du Mozambique et pénétrant dans l'île entre Maintirano et Morondava. Ces perturbations apportent des précipitations très importantes provoquant ainsi des inondations. Les hauteurs d'eau maximales observées sur la rivière de Morondava sont en grande partie engendrées par la présence des cyclones plus fort.

Des perturbations qui ont traversé la région durant les vingt dernières années sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 4).

**Tab. 4: Cyclones ayant causé des grands dégâts dans la zone de Morondava**

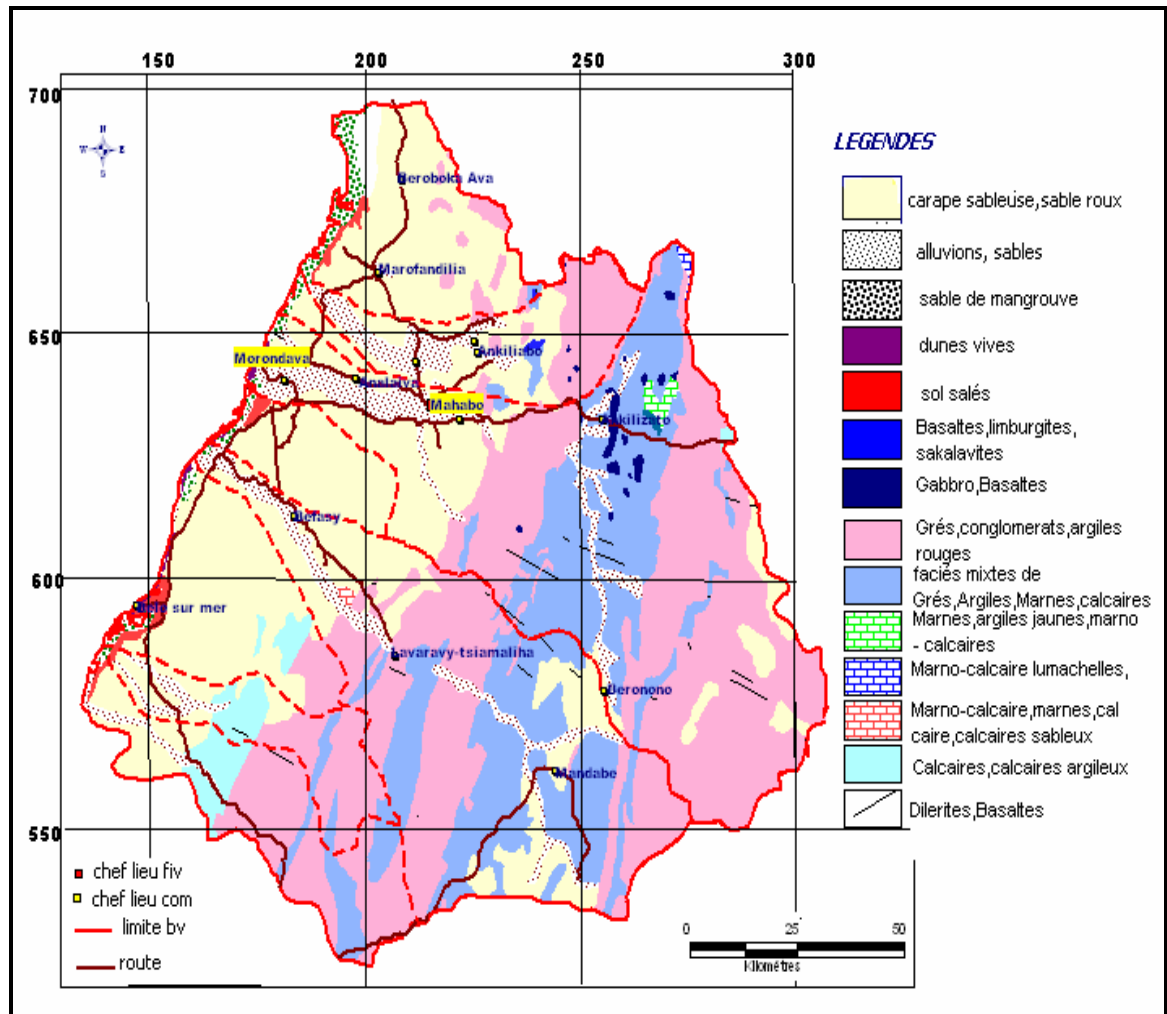
Perturbation	Date	Niveau d'eau/ débit	Date mesure	Site de mesure
<b>Cyclone tropical DANY</b>	06-08/02/69	H = 3,22 m Q = 1 928 m <sup>3</sup> /s	06/02/69 à 04 heures	Dabara/ Morondava
<b>Cyclone tropical GENEVIEVE</b>	16-18/01/70	H = 4,50 m Q = 3,080 m <sup>3</sup> /s	17/01/70 à 11 heures	Dabara/ Morondava
<b>Dépression tropicale FERNANDE</b>	01-03/02/75	H = 4,40 m Q = 12990 m <sup>3</sup> /s	01/02/1975 à 19 heures	Dabara/ Morondava
<b>Cyclone tropical HONORINE</b>	15-17/03/86	H = 2,20 m Q = 1.020 m <sup>3</sup> /s	16 /03/86 vers 12 heures	Dabara/ Morondava
<b>Dépression tropicale CALASANJY</b>	13-16/01/89	H = 4,08 m Q = 2.702 m <sup>3</sup> /s	15/01/89 à 5 heures	Dabara/ Morondava
<b>Dépression tropicale CYNTHIA</b>	17-18/02/91	H = 8,30 m Q = 6.500 m <sup>3</sup> /s	18/02/91	Dabara/ Morondava
<b>Cyclone tropical GRACIA</b>	22-23/02/93	-----	22-23/02/93	-----
<b>Cyclone tropical IONIA</b>	02-05/03/93	-----	02-05/03/93.	-----
<b>Cyclone Tropical ELINE</b>	17-18/02/00	Pluie max. 24 h : 46,5 mm	18/02/00	Morondava Aéroport
<b>Cyclone ELITA</b>	03 -04/02/04	-----	----	-----
<b>Cyclone GAFILO</b>	08-10/03/04	-----	-----	-----

*Source : Monographie de Menabe*

### III.2.2. Contexte géologique

La zone d'étude est installée sur des formations sédimentaires (Fig. 8) reposant certainement sur des socles cristallins constitués généralement de gneiss, de migmatites, localement des micaschistes et des cipolins appartenant au Système de Vohibory et au Groupe d'Amborompotsy.

Cette formation sédimentaire présente des alternances de formations marines et continentales formées de quatre séries (Besairie, 1973).



Source : BD 500 FTM

**Fig. 8: Carte géologique du Bassin de Morondava et ses environs**

#### II.2.2.1. Formation du Karoo

Elle est divisée en trois groupes (Sakoa, Sakamena, Isalo) :

*i. Groupe Sakoa* : sur la partie Est District de Mahabo, visible surtout au sud de Malaimbandy au contact du socle cristallin, se présentant en couches de couleur rouge avec alternance blanche de grès grossiers et d'argiles

*ii. Groupe de la Sakamena* : dans la partie Nord-Est de la zone d'Ambatolahy, descendant sur Tsimazava et allant jusqu'au sud de Mandabe et Manja (Vondrove) formé de schistes pélitiques à

plantes (présence de nombreux troncs de bois silicifiés enracinés en place), de grès grossiers ou argileux verts

*iii. Groupe de l'Isalo* : dans la partie Sud/Est District de Morondava (limite du massif de Makay), constitué en général par un ensemble de grès à stratification entrecroisée d'argile et de sable argileux.

#### **II.2.2.2. Formation jurassique moyen**

Formé par le plateau calcaire du Bemaraha et Besabora.

#### **II.2.2.3. Formation jurassique supérieur** (sud de la Tsiribihina)

Formé de calcaires marneux et, au sommet, de Calcaires oolithiques, riches en fossiles. C'est une série à faciès argileux prédominant.

**II.2.2.4. Formation récente** formé de carapace sableuse et de sable roux.

### **III.2.3. Contexte pédologique**

La région est caractérisée par une prédominance très nette de sols ferrugineux tropicaux sur l'ensemble de la région, de sols halomorphes en zone littorale, de sols minéraux bruts ou peu évolués sur les formations calcaires et calcaire-gréseuses, des sols d'apport (alluvions brutes ou peu évoluées formant les sols de baiboho) et par des sols hydro morphes sur la plaine.

### **III.2.4. Contexte Hydrographie - Hydrogéologique**

Le bassin dispose d'une potentialité énorme en eau de surface et de profondeur. D'importants et nombreux plans d'eau sont localisés dans sa partie Nord et Est (lacs, étangs et mares) (*Fig. 9*). Ainsi, il est essentiellement drainé par la rivière Morondava – Kabatomena.

#### **III.2.4.1. Hydrographie :**

La rivière Morondava prend sa source dans le massif calcaire basaltique et gréseux de Makay. Avec ses nombreux affluents tels que Sakamaly, Maroalika, Fanikay, elle arrose la partie centrale du District de Mahabo et continue son trajet vers le District de Morondava où elle se divise en deux principaux lits : Kabatomena et Morondava. (Chaperon et al, 1993).

A 50 km en amont de son embouchure et à quelques kilomètres en amont de sa séparation en deux bras (Morondava et Kabatomena), elle est captée par le barrage Dabara.

### III.2.4.2. Hydrogéologie

#### i. Etude géophysique

D'après les études géophysiques faites ultérieurement, nous avons pu identifier les caractères géophysiques par des sondages électriques et panneaux électriques des quelques villages qui se situent dans le bassin (Tab. 5).

Ces approches géophysiques permettent d'identifier la nature lithologique et la structure des systèmes aquifères. L'analyse des données obtenues permet de préciser l'épaisseur des différentes couches. En effet, différentes nappes peuvent être identifiées suivant la résistivité des couches.

**Tab. 5: Récapitulation données Géophysiques**

Secteur	Nombres des couches rencontrées	Couche (m)	Résistivités ( $\Omega$ m)	Observations
<b>Amboloando</b>	05 couches :			
	- une couche superficielle résistante, mince identifiée comme étant du calcaire ;	0.5	421	Aquifère
	- un terrain résistant argilo gréseux	5	133	Substratum
	- une couche faiblement résistante constituée de grès,	23	71	Toit
	- un terrain conducteur argileux, et un dernier terrain résistant	35 64	21 68	
<b>Marovoay</b>	03 couches :			
	- un terrain superficiel correspondant à la couverture sablo-argileuse,	1 à 4	700-3000	
	- un terrain qui apparaît juste en dessous de la précédente ;	1 à 2	120 et 400	
	- un terrain conducteur	---	30 à 60	base
<b>Androvabe</b>	03 couches :			
	- une formation résistante composée essentiellement de terres végétales sableuses,	1.5	30 à 40	Aquifère
	- une deuxième formation conductrice et enfin, une dernière couche conductrice	5	20 à 38 20	Substratum
<b>Ampasy</b>	03 couches :			
	- une couche superficielle formée d'alluvions salées	4 à 10	5	
	- une 2 <sup>ème</sup> couche conductrice 10 m environ	10	2	Aquifère
	- une 3 <sup>ème</sup> très conductrice		0.5	Substratum

*Sources : Andriamirado(2003), Ralaimaro (2004)*

#### ii. Différents types de nappe

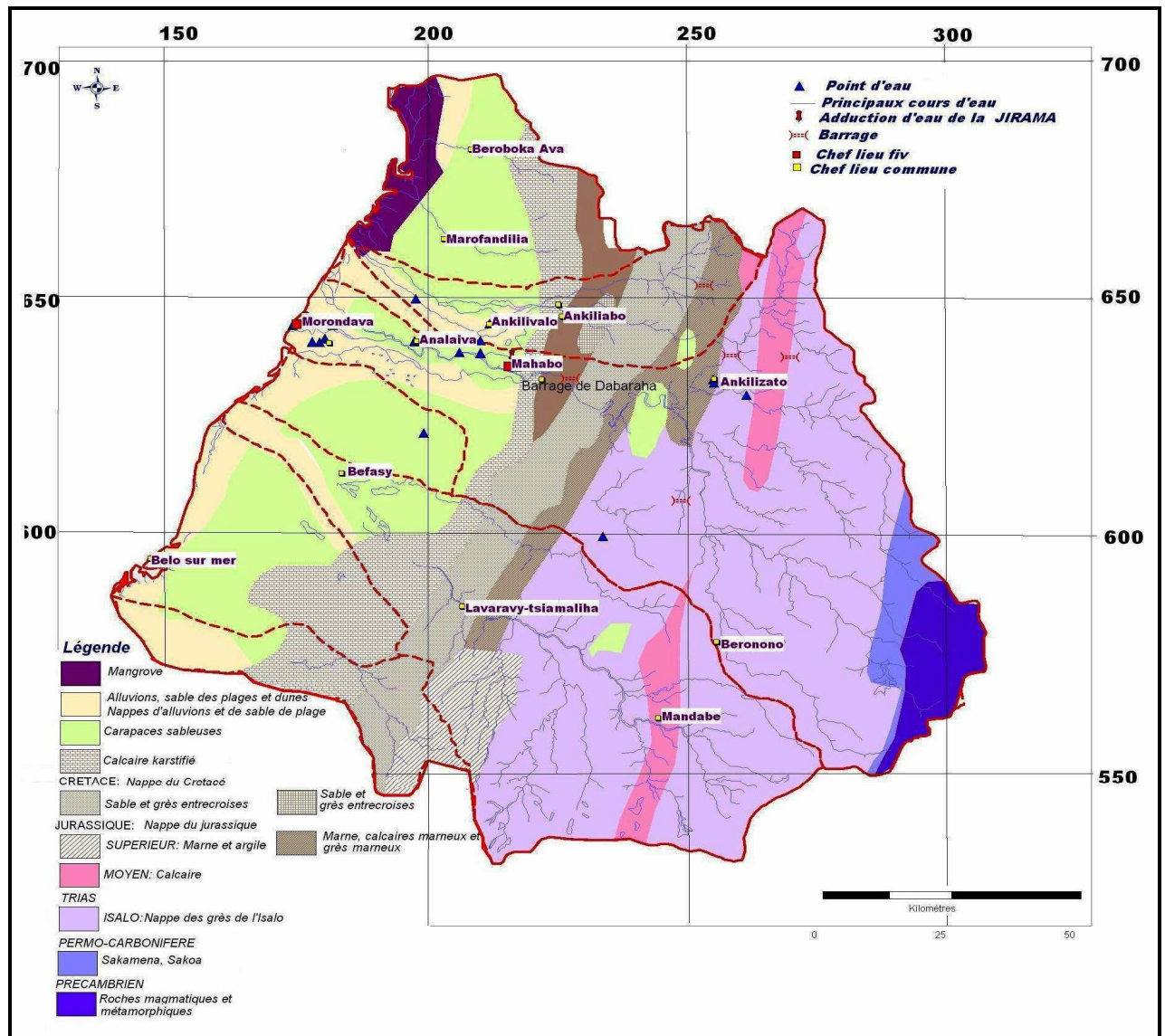
Les divers types de nappe dans le bassin de Morondava sont donnés par le tableau ci-dessous (Tab. 6) ainsi que la potentialité en eau souterraine:



Les principales nappes connues actuellement et exploitées sont :

- la nappe de grès de Crétacé (nombreuses sources et forage artésiennes à Manamby)
- la nappe des alluvions de Morondava, exploitée par la SUCOMA (Sucrerie Complant de Madagascar) et par la JIRAMA pour l'alimentation en eau de la ville de Morondava.
- la nappe des sables superficiels et des sables de plage pour l'alimentation en eau en milieu rural en particulier en zone littorale

Les ressources en eau du bassin de Morondava sont représentées par la carte ci-dessus (Fig. 9)



Source: BD 500 FTM

**Fig. 9: Ressources en eau dans le bassin de Morondava et ses environs**

**Tab. 6: Les divers types de nappe dans le bassin versant de Morondava**

<b>Nappes</b>	<b>Types</b>	<b>Lithologie</b>	<b>Porosité</b>	<b>Épaisseur de l'aquifère</b>	<b>NS</b>	<b>Qualité de l'eau</b>	<b>Débit spécifique (Q)</b>
<b>Nappe d'alluvions</b>	captive ou artésienne	sables fins	poreux	5 à 10 m	2 à 3 m	douce, bicarbonatée calcique	1 à 5 l/s/m
<b>Nappe des sables argileux supérieurs</b>	libre	Sables argileux	poreux	5 à 10 m	2 à 3 m	douce à saumâtre	0.6 à 1 l/s/m
<b>Nappe des sables de plage</b>	libre	Sables argileux	poreux	5 à 10 m	2 à 3 m	douce à saumâtre	0.04 à 0.55 l/s/m
<b>Nappe une formation quaternaire ancienne</b>	libre	Sables argileux fins	poreux	5 à 10 m	2 à 3 m	saumâtre	0.04 à 0.55 l/s/m
<b>Nappe de formation éocène</b>	libre	Calcaires ou grés argileux	poreux pour le grés, karstique fracturé pour le calcaire	jusqu' à 50 m	5 à 10 m	douce	0.5 à 15 l/s/m pour les grés et 1.8 à 68 l/s/m pour le calcaire
<b>Nappe de formation crétacée</b>	artésienne	Grés sableux	poreux	5 à 10 m	2 à 3 m	saumâtre	1 à 14 l/s/m débits artésiens 14 à 19 l/s/m
<b>Nappe de grés d'Isalo</b>	libre ou artésienne	Sables gréseux	poreux	50 m	2 à 3 m	saumâtre	0.5 l/s/m

*Source : RAKOTONDRAIBE, 1977; mis à jour 2005*

### III.3. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

#### III.3.1. Population

La répartition des populations par District et par Commune est présentée dans le *tableau* ci-dessous (*Tab. 7*).

**Tab. 7: Répartition des populations (INSTAT, 2004)**

District	Communes	Populations résidentes
Morondava	Morondava	34 369
	Androvabe	6 535
	Bemanonga	10 695
	Analaiva	11 142
Mahabo	Mahabo	8 568
	Ampanihy	6 932
	Ankilizato	19 129
	Malaimbandy	19 562
	Beronono	4 857
	Tsimazava	3 520
<b>TOTAL</b>		<b>125 309</b>

La Commune de Morondava présente une population plus élevée. Elle est le seul centre urbain ayant des activités de développement socio-économique importantes dans le bassin. En général, la population est formée par les « Sakalava » mais il y a aussi des immigrants.

#### III.3 2. Activités

Les activités sont très diverses et ce, selon les ethnies. Le tableau ci-dessous (*Tab. 8*) présente les principales ethnies avec leurs principales activités.

**Tab. 8: Les différentes ethnies et leurs activités**

Ethnies	Activités
<b>SAKALAVA</b>	Elevage extensif de zébus pour les cérémonies / agro éleveurs/ Culture de rente (pois du cap, Arachide)/ Pêche continentale/Cueillette & chasse.
<b>BARA</b>	Elevage extensif de zébus pour les cérémonies / agro éleveurs
<b>VEZO</b>	Pêche marine
<b>ANTESAKA</b>	Agriculture/ élevage de zébus
<b>BETSILEO</b>	Rizicultures / élevages domestiques (vente, animaux de trait)/ salariat agricole.
<b>ANTANDROY</b>	Agriculture / élevage extensif /élevages des petits ruminants (mouton, chèvre)/ salariat agricole/fabrication et vente de charbon
<b>MAHAFALY</b>	Agriculture / élevage domestiques (vente, animaux de trait) / élevages des petits ruminants (mouton, chèvre)
<b>ANTALOTSE</b>	Commerces
<b>MERINA</b>	Commerces/ riziculture et culture maraîchère/ pêche continentale

### III.3.3. Infrastructures sociales

#### III.3.3.1. Services de la santé

La couverture en infrastructure sanitaire publique est donnée par le *tableau* ci-dessous (Tab. 9).

**Tab. 9: Couverture sanitaires**

District	Formations sanitaires					Cabinet dentaire
	CHD2	CHD1	CSB2	CSB1	Dispensaire	
Morondava	1	-	8	9	05	03
Mahabo	-	1	1	3	-	

*Sources : DRSPF Menabe 2005 ; Rapports annuels SSD, 2005*

#### III.3.3.2. Services de l'éducation

La couverture en établissement scolaire et les effectifs des élèves sont donnés dans le *tableau* ci-dessous (Tab. 10).

**Tab. 10: Couverture éducative**

District	Nombre d'établissements			Effectifs des élèves		
	EPP	CEG	Lycée	EPP	CEG	Lycée
Morondava	112	16	4	19 311	4 135	1 072
Mahabo	95	06	01	19 800	1 700	825

*Source : DREN Menabe 2005/2006*

### III.4. CONTEXTE BIOLOGIQUE

#### III.4.1. Flores

La formation végétale la plus frappante et la plus attirante de la région de Morondava est *la forêt de baobab*. Madagascar en possède sept espèces différentes de baobab alors que l'Afrique n'en a qu'une seule. La hauteur varie de 10 à 40m, et le diamètre peut atteindre 6m. *Ces espèces sont capables de stocker de l'eau, d'où le nom "d'arbre bouteille"*.

#### III.4.2. Faunes

Pour la biodiversité faunistique, on peut identifier plusieurs familles mais celle qui nous intéresse vivement est les familles aquatiques qui constituent des objets d'attractions écotouristiques :

- Reptiles: Crocodile (milotieus)
- Amphibiens: *Mantella expectata* (Sahonakely)
- Oiseaux: *Anas bernieri* (Mireha), *Sarkidiormis melamotos* (Ongongo), *Netapus auritus* (Sadakely), *Viduata* (vivy).

### III.5. UTILISATION DES RESSOURCES ET ESTIMATION DES BESOINS EN EAU

Chaque organisme vivant est caractérisé par son besoin minimal en eau. Nous avons distingué cinq secteurs d'utilisation d'eau : secteur alimentation en eau potable, secteur élevage, secteur agriculture, secteur infrastructures sanitaires et éducatifs et secteur tourisme.

#### III.5.1. Secteur alimentation en eau potable

L'approvisionnement en eau est assuré par la JIRAMA au niveau des chefs lieux de deux Districts Morondava et Mahabo.

A Morondava ville, 89.35% de la population totale est desservie en eau potable.

Mais en milieu rural, la plupart des points d'eau installés sont des puits traditionnels ou aménagés, des puits modernes ou forages équipés d'une pompe manuelle ou pédalée (*Planches photos, Annexe 04 : 2-a, b, c*) implantés par UNICEF et la Coopération Japonaise (JICA). La qualité des eaux de ces points d'eau modernes est jugée potable.

Pour Mahabo, bien qu'il soit parmi les grands centres urbains desservis par JIRAMA, 75% de la population n'ont pas encore accès à l'eau de la JIRAMA. En effet, seulement 13% en moyenne de la population ont accès à l'eau potable faute de gestion des infrastructures ainsi que le non respect de l'environnement (*Planches photos, Annexe 04 : 2- d*).

Le tableau suivant (*Tab. 11*) représente les points d'eau potable inventoriés et la population desservie dans le bassin de Morondava.

**Tab. 11: Points d'eau potable et population desservie dans le bassin versant de Morondava**

	Point d'eau (PE) et population desservie			
	Inventoriés	Fonctionnels	Equipés d'une pompe	Population desservie en (%)
<b>Morondava</b>	249	216	101	49
<b>Mahabo</b>	317	268	100	56

*Source: Inventaire des points d'eau MEM 2006*

Le tableau ci-dessous (*Tab. 12*) présente le nombre d'abonné de la JIRAMA

**Tab. 12: Nombre de population abonnée au JIRAMA**

	Nombre d'abonné moyenne	Nombre de BF Public
<b>Morondava</b>	2732	----
<b>Mahabo</b>	241	10

*Sources : JIRAMA Mahabo, Morondava janv 2007*

L'estimation des besoins en eau potable est basée sur le nombre d'habitants (hab) dans la zone d'étude, en fonction du besoin ou débit unitaire (q) or la consommation est différente en ville

et en campagne. Pour Madagascar  $q$  est de l'ordre de 40 l/j/hab. (Code de l'eau, 1999) mais pour la partie Sud-Ouest,  $q$  est conçu suivant la consommation 20 l/j/hab. recommandée l'OMS.

Hypothèse de calcul

$q$  : 20 l/j/hab

$N$  : nombre de population

$C_j$  : consommation journalière :  $q \times N$

Le tableau ci-dessous donne la répartition des besoins en eau potable des deux Districts (Tab. 13).

**Tab. 13: Répartition des besoins en eau**

Districts	Nombre de population en 2004	Besoins en eau potable en m <sup>3</sup> /jour	Besoins en eau potable en m <sup>3</sup> / an
Morondava	62 741	1254.82	4580 09.3
Mahabo	62 586	1251.72	456877.8

**III.5.2. Secteur élevage**

L'élevage demeure une activité importante dans le bassin de Morondava. On peut distinguer deux catégories : élevage extensif de zébus et élevage domestique de bovins. Entre les deux élevages, on remarque aussi un élevage semi extensif d'ovins, caprins, porcins et volailles.

En général, l'alimentation en eau de ces bétails se fait directement sur les ressources en eau de surfaces. Il y a aussi des règles régissant les besoins en eau pour l'abreuvement de ces bétails qui sont limités de 4 l/j/tête pour le petit bétail et 30 l/j/tête pour les gros bétails (Tab. 14 et 15).

**Tab. 14: Besoin en eau théorique par type d'élevage**

Type d'élevage	Bovin	Caprin	Ovin	Porcin	Volailles
Besoin en eau théorique (litres/j/tête)	30	4	4	15	1

Source : MAEP, Ampandrianomby-Antananarivo année 2003

**Tab. 15: Répartition des bétails et besoins en eau**

Districts	bétail en 2003					Besoins en eau en m <sup>3</sup> /jour				
	bovins	porcins	ovins	caprins	volailles	bovins	porcins	ovins	caprins	volailles
Morondava	50000	150	1000	10000	28000	1500	2.25	4	40	28
Mahabo	100000	2000	6000	1000	150000	3000	30	24	4	150

Source : MAEP Ampandrianomby-Antananarivo année 2003

*Hypothèse de calcul :*

**Nb:** nombre de bétail

**bp:** besoins en eau théorique par type de bétail

**Bp:** besoins en eau du bétail :  $N \times bp$

### **III.5.3. Secteur agriculture**

Les besoins en eau d'une plante sont en fonction de trois facteurs principaux : le climat, l'espèce végétale et le moment du cycle végétatif. Le dosage de l'eau dépend aussi de la qualité du sol. Pour estimer les besoins en eau de ce secteur, on peut se baser sur la norme donnée par le Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de La Pêche durant la campagne agricole 2004-2005 concernant les superficies par type de culture dans la région et les besoins théoriques des cultures.

**Tab. 16: Besoin en eau théorique par types de culture**

Type de culture	Riz	Maïs	Haricot	Pois du Cap	Manioc	Patate	Arachide
Besoins en eau théoriques (m <sup>3</sup> /j/ha)	96	11	23	21	42	35	32

*Source : MAEP, Ampandrianomby-Antananarivo année 2003*

Le bassin versant dispose d'un potentiel agricole important. Il est caractérisé par une immense superficie cultivable et des milieux naturels diversifiés favorables aux différents types de cultures. Mais pour cette étude, nous intéresserons à la riziculture qui a besoin d'une grande quantité d'eau :

➤ la riziculture irriguée a comme ressource en eau d'irrigation la rivière de Morondava au barrage Dabara (Planches photos, Annexe 04 :5). Il s'agit d'un grand périmètre irrigué (GPI) qui prend l'eau au fil du barrage de Dabara et distribuée par un réseau hydro agricole très complexe

➤ la riziculture du GPI d'Ankilizato.

En gros, 72% de la surface totale en cultures vivrières sont occupées par les rizicultures dans le bassin de Morondava.

La superficie rizicultivée et les besoins en eau sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 17).

**Tab. 17: Répartition des surfaces irriguées (ha) et besoin en eau.**

Districts	Surface total irriguée (ha)	Besoins en eau	
		m <sup>3</sup> /j	m <sup>3</sup> /an
Dabara	8000	768000	280 320 000
Ankilizato	2900	278400	101 616 000

Hypothèse de calcul :

**St:** superficie total cultivée

**bt:** besoins en eau théorique par types de cultures

**Bt:** besoins théoriques en eau : **St x bt**

### **III.5.4. Secteur Infrastructures sanitaires et éducatives**

Tous les secteurs qui utilisent de l'eau tiennent une place importante dans la gestion des ressources en eau. Considérons les secteurs éducatifs et sanitaires.

#### **III.5.4.1. Infrastructures sanitaires**

L'évaluation des besoins en eau pour les établissements sanitaires est fonction du nombre de patients par jour qui est estimé à 30 patients (DRSPF Menabe, 2005) avec comme besoins en eau journalière de 40 l/j en moyenne.

$$\text{Besoins} = 30 \times 40 \text{l/j} \Leftrightarrow 30 \times 40 \times 365 \text{l/an} = 438\,000 \text{ l/an}$$

#### **III.5.4.2. Infrastructures éducatives**

L'évaluation des besoins eau des infrastructures scolaires est basée sur les nombres totaux des effectifs avec comme besoins en eau de 3 litres par élève par jour moyen. Les nombres des élèves et leurs besoins en eau estimés sont présentés dans *les tableaux* ci-dessous (*Tab.18 et 19*).

**Tab. 18: Répartition des nombres des élèves dans la zone d'étude**

District	Nombre d'établissements			Effectifs des élèves		
	EPP	CEG	Lycée	EPP	CEG	Lycée
<b>Morondava</b>	112	16	4	19 311	4 135	1 072
<b>Mahabo</b>	95	06	01	19 800	1 700	825

*Source : Monographie UPRD 2003*

**Tab. 19: Besoins en eau journalière des élèves**

District	Effectifs des élèves			Besoins en eau (m <sup>3</sup> /j)		
	EPP	CEG	Lycée	EPP	CEG	Lycée
<b>Morondava</b>	19 311	4 135	1 072	57.933	12.405	3.216
<b>Mahabo</b>	19 800	1 700	825	59.4	5.1	2.475

*Source : Monographie UPRD 2003*



### **II.5.5. Secteur Tourisme**

Notre zone d'étude figure parmi les zones à forte potentialité touristique, nous avons recensé 30 établissements d'accueil et de restaurations dont 2 à Mahabo.

Pour l'estimation des besoins en eau de ce secteur (*Tab. 20*), le calcul est basé sur la capacité d'accueil selon les catégories en estimant que la capacité d'une chambre est de 2 personnes avec comme besoin en eau moyenne de 150 l/j/touriste en moyenne.

**Tab. 20: Besoins en eau du secteur Tourisme**

<b>Districts</b>	<b>Nombre de chambres</b>	<b>Nombre par chambre</b>	<b>Besoins en eau (m<sup>3</sup>/j)</b>
<b>Morondava</b>	326	652	97.8
<b>Mahabo</b>	08	16	2.4

L'évaluation des ressources disponibles et le recensement des différents utilisateurs avec leurs besoins (agriculture, eau potable, industrie, élevages ...) sont très nécessaires avant de faire la modélisation sur le logiciel Weap. Un travail de terrain et une documentation (*Annexe 01*) ont été réalisés pour l'élaboration de ce rapport de recherches. Cela est utile pour connaître l'état initial de la zone d'études et de faire le diagnostic afin d'établir un scénario d'allocation pour que le logiciel pourra évaluer les besoins futurs dans tous les domaines d'utilisation.

## **PARTIE IV**

# ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES

Etant donné que le modèle WEAP est un outil informatique permettant de planifier la gestion intégrée des besoins en eau, la gestion intégrée des ressources en eau nécessite certaine connaissance sur :

- la réserve et la ressource
- les caractères physico-chimiques et bactériologiques
- les sites de l'offre ou captage et les sites de demandes

Des données collectives à ces points ont été collectées au niveau de certaines institutions travaillant dans le secteur de l'eau et de l'assainissement.

#### **IV.1. LES DONNEES TRAITÉES**

Nous avons choisi comme période de référence les années entre 2000 et 2006.

Les données collectées et portées dans WEAP concernent :

- les sites de demandes avec leur emplacement : urbains (ville), zone de culture, zone d'accueil touristique, zone d'élevages, zone industrielle, infrastructures sanitaires et éducatives
- les ressources et les lieux de captage (site de l'offre) : barrage de dérivation, tracé des rivières, eaux souterraines exploitées (forages, puits, citerne), données hydrologiques, autres ressources.

##### **IV.1.1. Sites de demandes**

Informations concernant :

- le niveau d'activité annuelle qui détermine la demande tel que la surface agricole, le nombre d'usagers de l'eau pour des motifs domestiques ou industriels
- la consommation annuelle ou le niveau de consommation d'eau par unité d'activités
- la variation mensuelle ou la part mensuelle de la demande annuelle
- le taux de consommation ou le pourcentage du débit d'entrée consommé.

Les informations au niveau des sites de demandes sont représentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 21).

**Tab. 21: Les informations nécessaires pour les sites de demandes**

Sites de demandes	Niveau d'activité annuelle	Niveau d'activité annuelle	Variation mensuelle	Consommation m <sup>3</sup> / j
Ville : Morondava Mahabo	Nombre population 62 741 63 568	7,3 m <sup>3</sup> /an/pers 7,3 m <sup>3</sup> /an/pers	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	0.02

Sites de demandes	Niveau d'activité annuelle	Niveau d'activité annuelle	Variation mensuelle	Consommation m <sup>3</sup> / j
Sites agricultures : GPI Dabara GPI Ankilizato	8000 ha 2900 ha	788 000 m <sup>3</sup> /an 278 400 m <sup>3</sup> /an  35040 m <sup>3</sup> /ha/an	Avril – 5% Mai – Juin 10% Juill 20% Août 30% Sept 25% Oct – Mars 0%	96
Tourisme  Hôtel	Nombre chambre estimé à 2 pers/chb 334 chambres 668 personnes	36 573 m <sup>3</sup> /an 54.75 m <sup>3</sup> /tour/an	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	0.15
Elevages : - bovins - caprins - ovins - porcins - volailles	Nombre de bétails 150 000 11 000 7 000 2 150 178 000	10.95 m <sup>3</sup> /an/tête 1.46 m <sup>3</sup> /an/tête 1.46 m <sup>3</sup> /an/tête 5.475 m <sup>3</sup> /an/tête 0.365 m <sup>3</sup> /an/tête	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	0.03 0.004 0.004 0.015 0.001
Santés	Nombre de patients 30/jrs en moyennes 10 950	159 870 m <sup>3</sup> /an 146 m <sup>3</sup> /an/patient	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	0.04
Educations  Morondava Mahabo	Nombre d'élèves EPP, CEG. Lycées 24 518 22 325	10 mois d'année scolaire 9.12 m <sup>3</sup> /an/élève 9.12 m <sup>3</sup> /an/élève	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	0.03
Industrie : SUCOMA	2400 ha de canne à sucre	80600 m <sup>3</sup>	Proportionnel au nombre de jours dans un mois	

#### **IV.1.2. Barrage de retenue**

Les données nécessaires sont les débits mesurés au niveau du barrage Dabara. Ce barrage assure la grande partie de l'irrigation de la plaine de Morondava. Les terres irriguées par ce réseau couvrent une superficie de 8000 ha

Le débit nominal est de 12 m<sup>3</sup>/s, et en débit d'étiage de l'ordre de 8m<sup>3</sup>/s à 9 m<sup>3</sup>/s. Le tableau suivant montre la variation journalière du débit pendant la période cyclonique du mois de décembre et janvier 2007.

**Tab. 22:** Variation journalière du débit à Dabara

Jours	Hauteur d'eau (He : m)				Débit (Q : m <sup>3</sup> /s)
	Rive Droite		Rive Gauche		
	Matin	Soir	Matin	Soir	
23 - Déc 06	8.35	8.35	8.31	8.31	13
24	8.27	8.27	8.26	8.26	13
25	8.15	8.15	8.15	8.15	13
26	8.19	8.19	8.19	8.19	12
27	8.13	8.13	8.15	8.15	12
28	Décharge (dessablement)				
29	8.25	8.25	8.26	8.26	12
30	8.5	8.5	8.5	8.5	10
31	8.5	8.5	8.5	8.5	13
01-Janv 07	Pas de lecture				
02	8.38	8.38	8.38	8.38	13
03 - 15	Crues (débordement)				
15 -16	Décharge (dessablement)				
17	8.30	8.30	8.30	8.30	12
18	8.40	8.40	8.38	8.38	12
19	8.18	8.10	8.00	8.00	12
20	8.10	8.10	7.99	7.99	11
21-22	Crues (débordement)				
23	8.10	8.10	7.99	7.99	12

*Source : Responsable relevés Barrage Dabara (janv. 2007)*

### IV.1.3. Rivières

La principale ressource en eau de rivière est la Morondava qui prend sa source dans la massif de Makay avec ses trois affluents : Beritsoka, Sakamaly, Fanaiky. Elle arrose et (ou) draine une grande partie des Districts de Morondava et Mahabo.

Le débit de la rivière est mesuré au niveau de la prise d'eau de Dabara, en bordure de la RN 35 (Planches photos, Annexe 04 :5) et l'évaporation à la station météorologique de Morondava Aéroport. (Planches photos, Annexe 04 : 4). Ces données sont présentées dans le tableau (*tab. 23*) ci-dessous.

**Tab. 23: Débits et évaporation potentielle (ETP) dans le Bassin**

Débit de tête (Q)	Variation mensuelle du débit donnée par l'étude AH-SATEC											
	jan	fev	mars	avril	mai	juin	jull	août	sept	oct	nov	déc.
	141	138	94.0	19.1	12.2	11	10.4	9.3	8.7	8.1	19.1	107
Débit vers les nappes (infiltration)	0.6 m <sup>3</sup> /s											
Evaporation ETP	Variation mensuelle											
	jan	fev	mars	avril	mai	juin	jull	août	sept	oct	nov	déc.
	123.1	106.3	110.6	87.3	63.3	43.6	48.4	53.6	65.7	90.7	107.5	123.8
Longueur du bief	152 300km											

*Sources : RAKOTONDRAINIBE (2005), Min Agri, Rapport intérimaire SOGREAH INGENIERIE (1995)*

#### **IV.1.4. Eaux souterraines**

Pour les eaux souterraines, quatre types de nappes sont supposés exploités :

- les nappes des sables de plage et les nappes alluviales
- les nappes des formations crétaées
- les nappes gréseuses d'Isalo.

Ces nappes sont exploitées pour l'alimentation en eau potable, par le JIRAMA (Morondava (quatre forages), Mahabo (deux forages) et par certains villages à l'aide des puits et forages presque dans la totalité du bassin.

L'emplacement des eaux souterraines dans la Région sont :

- l'emplacement des JIRAMA (Morondava, Mahabo). Ces emplacements sont nommé Réservoir de la JIRAMA dans le modèle
- les autres sources qui sont des forages et puits implantés par le MEM ou les ONG.

Les données nécessaires concernent donc :

##### ***i. Les nappes souterraines avec :***

- la capacité de stockage qui indique la capacité maximale théorique de l'aquifère
- le stockage initial qui traduit la quantité d'eau stockée dans l'aquifère au début de la simulation
- la recharge naturelle ou le débit mensuel vers la nappe
- le prélèvement maximal ou la quantité maximale qui peut être prélevé de l'aquifère tous les mois par tous les emplacements reliés aux sites de demande. En général, le maximum est égal à la capacité de pompage mensuelle.

Ces informations sont représentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 24).

##### **Hypothèse de calcul :**

La recharge naturelle concerne à l'infiltration de pluie par mois.

L'infiltration en moyenne annuelle de pluie est de 10% des précipitation (P) soit 2m<sup>3</sup>/an environ en moyenne annuelle (Min. Agri Rapport intérimaire SOGREAH INGENIERIE).

Pour calculer l'infiltration mensuelle nous considérons la période de pluie Octobre à Mars y compris la période cyclonique. D'où on obtient l'infiltration moyenne mensuelle de  $0.16 \text{ m}^3$

**Tab. 24: Les informations nécessaires pour les ressources en eaux souterraines**

Variables	Aquifères alluviales				Aquifères crétacés				Aquifère gréseux			
Capacité de stockage	illimité				illimité				illimité			
Stockage initial	illimité				illimité				illimité			
Recharges naturelles	Variation mensuelle ( $\text{m}^3/\text{s}$ )											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
	0.16	0.16	0.16	00	00	00	00	00	00	0.16	0.16	0.16
Prélèvement max	93000 $\text{m}^3/\text{mois}$				434000 $\text{m}^3/\text{mois}$				155000 $\text{m}^3/\text{mois}$			
Méthodes	<b>ESou - ESur</b>				<b>ESou - ESur</b>				<b>ESou - ESur</b>			

*ESou* : eau souterraine ; *ESur* : eau de surface ; *ESou - ESur* : interaction eau souterraine eau de surface

Le prélèvement max en considérant le débit de pompage pour les nappes sont :

- nappe de sable de plage et d'alluvions : Q : 0.4 à 2 l/s
- nappe des formations crétacé : Q : 1 à 14 l/s
- nappe de grés d'Isalo : Q : 0.5 à 15 l/s (Tab. 6, page. 35)

#### ii. Les réservoirs de la JIRAMA

Il faut les informations sur :

- le débit entrant qui indique le débit entrant mensuel dans le réservoir local
- la capacité de stockage ou capacité totale du réservoir
- le stockage initial ou la quantité stockée dans la retenue au début de la simulation
- les informations nécessaires pour les réservoirs de la JIRAMA sont données dans les tableaux suivants (Tab. 25a, 25b)

**Tab. 25a : Les débits, capacités de stockages**

JIRAMA	Débits entrants (Q/mois)	Capacités de stockage	Stockage initial
Morondava	12400	400 m3	400 m3
Mahabo	7750	250 m3	250 m3

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

Ces informations sont données par le tableau suivant (Tab.25b)

**Tab. 25 b: Evaporation nette**

Evaporation nette Station Morondava Latitude 20° 17												
Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E - P	-132.9	-77.1	-26.4	75.3	54.3	41.6	47.4	51.6	60.7	79.7	88.5	6.8
Evaporation nette Station Mahabo Latitude 20° 22												
Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E - P	-172.6	- 80.1	- 40	78.7	63.5	59.3	50.9	56.1	73.6	89.1	84.3	-16.9

Source : bilan hydrique de Madagascar

Une évaporation négative indique un apport d'eau.

### iii. Les autres points d'eau

Pour les autres points d'eau, il faut le débit mensuel entrant dans la source d'approvisionnement locale. Dans notre cas il s'agit de forage d'eau donc c'est le débit du forage pendant un essai de pompage.

Ces données sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 26).

**Tab. 26: Informations nécessaire pour les autres points d'eau.**

Localités	Profondeur (m)	Débit (m <sup>3</sup> /mois)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Niveau statique (m)
Morondava	70	0.1178	0.0038	2.93
Mahabo	66	0.1232	0.00426	2.15
Mahabo – Malaimbandy	60	0.031	0.00088	3.19

Sources : Représentant MEM Morondava, détail des forages effectué par le JICA année 2005

## IV.1.5. Hydrologie

Un bassin versant ou captation est un secteur défini pour l'utilisateur dans un affichage schématique dans lequel on indique des processus tels que la précipitation, l'évapotranspiration, l'écoulement, l'irrigation et les rendements, qualité de l'eau.....etc. (Jack Sieber et all, Stockholm Environment Institute, www.seib.org)

En hydrologie, WEAP propose de modéliser un bassin versant ou captation en trois (3) modèles :

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

Dans cette étude, nous avons choisi de faire seulement la modélisation d'écoulement et précipitation.



Cette méthode consiste à déterminer l'évapotranspiration pour l'irrigation en utilisant les coefficients de récolte. Le reste des précipitations non consommé par évapotranspiration est simulé comme écoulement vers un fleuve, ou proportionné parmi l'écoulement des eaux souterraines par l'intermédiaire des liens de captation.

Pour la modélisation du bassin versant, le modèle d'écoulement et précipitation nécessite :

➤ *pour la branche occupation du sol*

- la surface cultivable dans le bassin : le GPI Dabara et le GPI Ankilizato
- le Kc ou coefficient de la plante relatif à la plante de référence (riz)
- la précipitation effective ou le pourcentage de précipitations disponibles pour l'évapotranspiration.

**Tab. 27: Informations nécessaires pour l'occupation du sol**

Surfaces rizicultivées	Kc		Précipitation effective
10 900 ha	Sept – Fev	0.9	80%
	Mars	1.0	
	Avril	1.1	
	May	1.4	
	Juin - Août	1.1	

➤ *pour la branche climat*

- la précipitation (P) ou la moyenne des précipitations mensuelles dans le bassin. En considérant les données pluviométriques de l'année 2000 qui sont comprises dans l'année de référence.

- l'évapotranspiration (ETR) ou l'évapotranspiration mensuelle d'un terrain de référence.

**Tab. 28: Les informations nécessaires pour la branche climatique**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>P</b>	307.3	442.7	89.6	00	00	1.8	00	00	0.2	00	12.6	69.2
<b>ETRéf</b>	123.1	106.9	110.6	66	28	12	7	7	8	12	20	117

*Source : (Rakotondraibe, 1974 ; 2005)*

#### **IV.1.6. Qualité de l'eau**

Nous avons choisi huit (8) forages supposés représentatifs de chaque commune pour faire la modélisation de la qualité de l'eau, avec sept (7) paramètres : pH, conductivité (cond), turbidité (turb), minéralisation (Miné), température (T) (élément indicateur de la qualité physico-chimique), Matières organiques (M.O), nitrites (NO<sub>3</sub>), azote (NH<sub>4</sub>) (éléments indicatifs de pollution), selon la disponibilité des données.

- La température (T), elle ne doit pas être >15°C pour qu'il n'y a pas de prolifération de germe.

- Le pH qui indique l'acidité de l'eau, il est défini comme la concentration en ions  $H^+$  dans une eau, l'idéal est entre 6.5-8.5 (*Annexe 01bis*).
- La turbidité (turb), elle traduit par la présence des matières étrangères en suspension dans l'eau, se définit comme la non limpidité ou non transparence d'une eau. Pour la norme elle ne doit pas dépasser si possible 5 NTU.
- La minéralisation (Miné) qui exprime la somme des éléments ou la composition chimique de l'eau. Elle est mesurée par les résidus secs ou compacts qui s'obtiennent après évaporation de l'eau. En général, la minéralisation est égale à la conductivité multipliée par 200 (Degremont, 1963).
- La conductivité (cond) qui représente le sel contenu dans l'eau, pour l'eau potable la conductivité doit être  $< 2000 \mu S/cm$  à  $20^\circ C$ . (*Annexe 01bis*)
- Les Matières organiques (MO) qui indique la concentration en MO
- La concentration en Nitrites ( $NO_3$ ) qui indique la concentration en  $NO_3$  de l'eau souterraine, sa présence indique souvent une source de pollutions.
- La concentration en Azote ( $NH_4^+$ ) qui indique la concentration en  $NH_4$  de l'eau souterraine.

**Tab. 29: Listes des éléments à modéliser indiquant le source de polluants**

Identification	T (°C)	Cond ( $\mu S/cm$ )	pH	Turb (NTH)	Miné (mg/l)	M.O (mg/l)	$NH_4^+$ (mg/l)	$NO_2^-$ (mg/l)
<b>Aquifère alluviale</b> Morondava	16	387	7.73	1.48	359	2.3	0.06	0
<b>Aquifère crétacé</b> Mahabo	25.8	228	7.1	0.99	227	00	00	0.03
<b>Aquifère gréseux</b> Mahabo- Malaimbandy	25.2	656	7.38	0.2	6.03	00	00	0.04
<b>Forage 1</b> Morondava	16	307	6.51	1.45	285	1.15	0.08	00
<b>Forage 2</b> Mahabo	17.8	107	6.38	1.66	100	00	00	00
<b>Forage 3</b> Mahabo- Malaimbandy	25.2	724	7.5	2.1	688	00	00	0.03

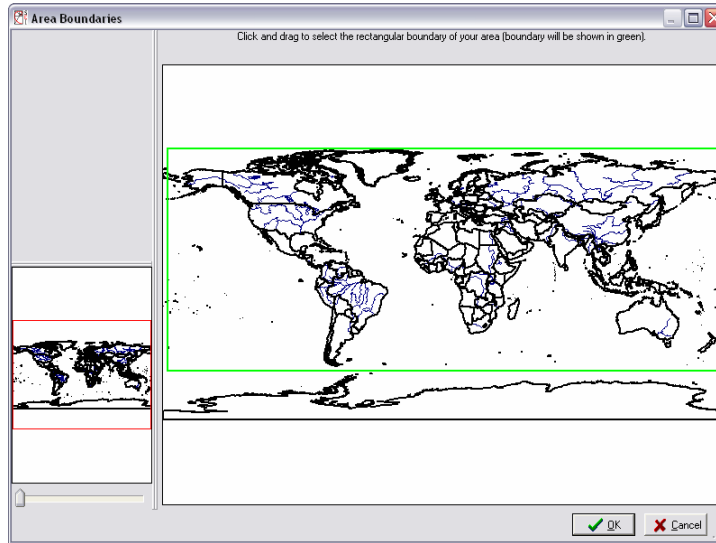
*Source : Banque de données points d'eau dans tout Madagascar MEM-DEA*

## **IV.2. MODELISATION PAR WEAP**

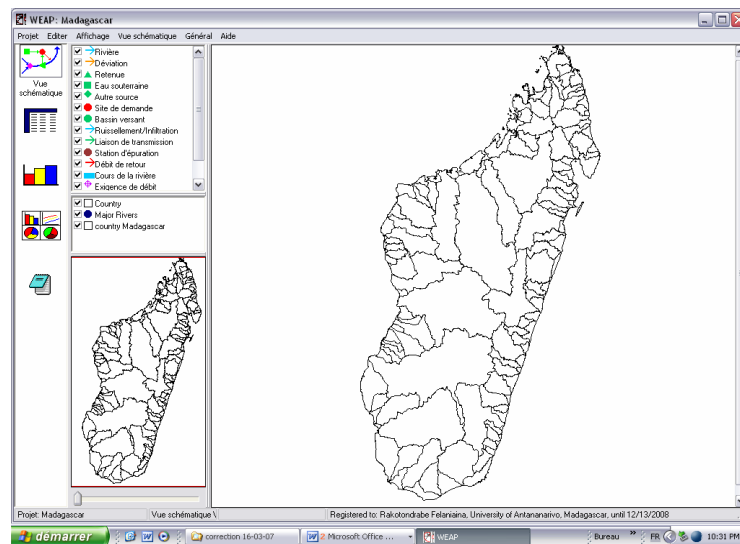
### **IV.2.1. Cartographie**

#### **IV.2.1.1. Création du modèle Bassin versant de Morondava**

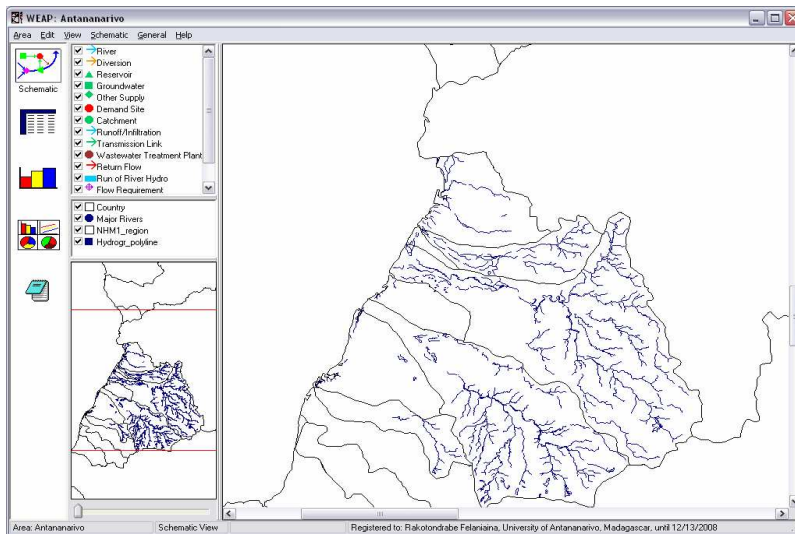
Dans WEAP, il existe déjà une carte du monde où on peut choisir et créer la zone d'étude. (*Fig. 10a*). En sélectionnant la carte de Madagascar (*Fig.10b*), puis on ajoute la limite du bassin versant ensuite le réseau hydrographique Morondava sous fichier ArcWeiv BD500 (FTM) comme couche du fond. La carte du nouveau projet nommé "Bassin versant de Morondava" est créée (*Fig. 10c*).



**Fig. 10a : Carte du Monde**



**Fig. 10b : Carte limite des bassins versants de Madagascar**



**Fig. 10c: Carte du bassin versant de Morondava avec les réseaux hydrographiques.**

## IV.2.1.2. Réglage des paramètres généraux

Dans cette partie, les paramètres temps devraient être réglés. Créer une année de comptes courants pour le projet. Dans cette étude, nous limitons entre 2000 – 2006 pour toutes informations sur le système (sites de demandes, données d'approvisionnement,...).

## IV.2.1.3. Numérisations des éléments nécessaires dans le modèle

On numérise les rivières, les emplacements urbains, la zone de l'agriculture, du tourisme, des élevages, les infrastructures. Et on saisit les données nécessaires pour chaque utilisateur en cliquant droite sur les emplacements numérisés.

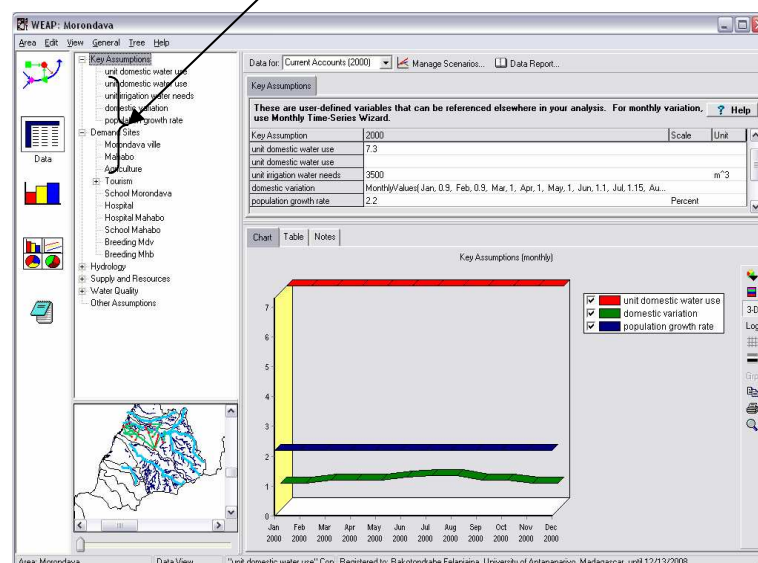
## IV.2.2. Création des hypothèses clés

Quatre (4) hypothèses principales sont créées (Fig.11)

- l'utilisation d'eau domestique
- les besoins en eau pour l'irrigation
- pourcentage d'utilisation d'eau mensuel
- le taux de croissance de la population pour l'année du scénario futur.

A noter que WEAP possède une fonction qui permet de calculer automatiquement le nombre de population d'avenir. Le logiciel modélise automatiquement les besoins en eau d'avenir en fonction des utilisateurs et les changements climatiques.

Les hypothèses clés

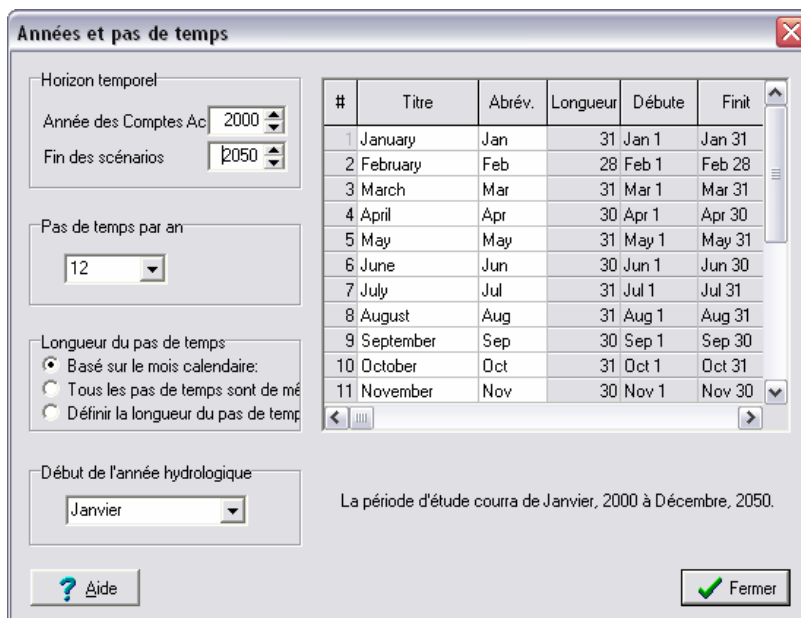


**Fig. 11:** Fenêtre montrant les hypothèses clés

### IV.2.3. Création des scénarii

#### IV.2.3.1. Changement d'horizon de temps du secteur

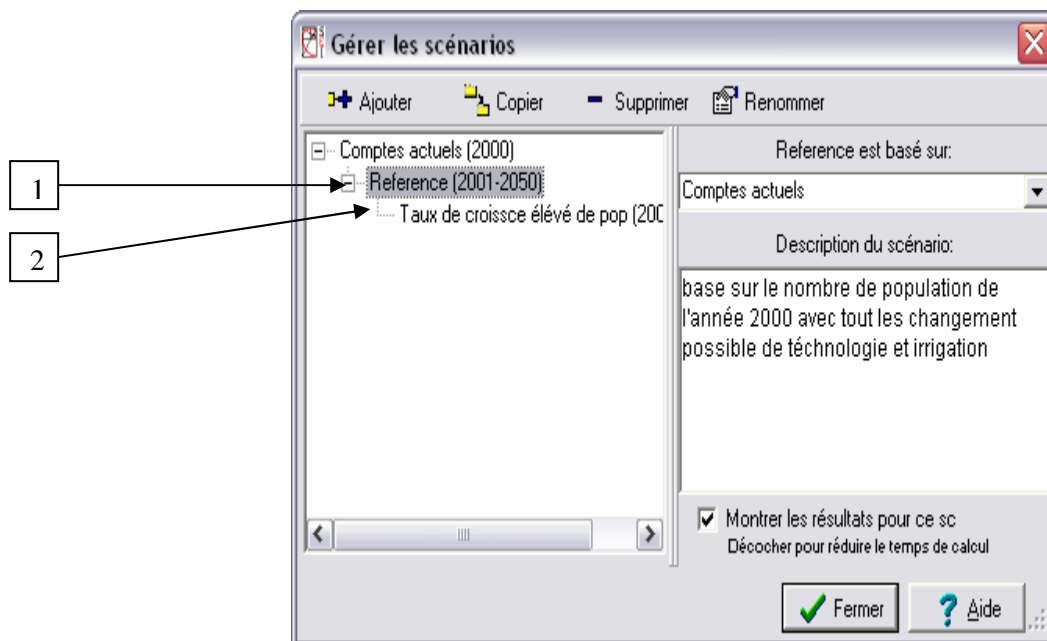
Le compte courant est créé depuis que nous avons créé la zone d'étude. On change juste l'année de la fin des scénarii (Fig. 12). En choisissant comme compte courant (2000 – 2006) et année de fin des scénarii 2050.



**Fig. 12 : Création du scénario**

#### IV.2.3.2. Création de scénario de référence

Le scénario de référence (sc 1) est un scénario hérité du compte courant. Il faut changer sa description pour refléter son rôle réel. Pour cela, quelques valeurs déjà activées dans le compte courant devraient être changées (Fig. 13).



**Fig. 13: Scénario de référence**

### ***i. Changement d'unité du taux d'utilisation d'eau pour l'irrigation***

Les besoins en eau pour les années à venir doivent être interpolés. Pour ce faire, WEAP possède une fonction en générant une expression sur « Générateur d'expression », choisir « Assistante des séries annuelles », puis on saisit les séries chronologiques d'années et les besoins en eau correspondants.

Les surfaces vivrières vont augmenter dans les prochaines années, il faut donc évaluer le taux de besoin en eau pour l'irrigation dans le scénario de référence. (Tab. 30, Fig.14)

Le calcul des besoins en eau futurs se fait à partir de la formule :

$$B : B_i (1+Y_i)^n$$

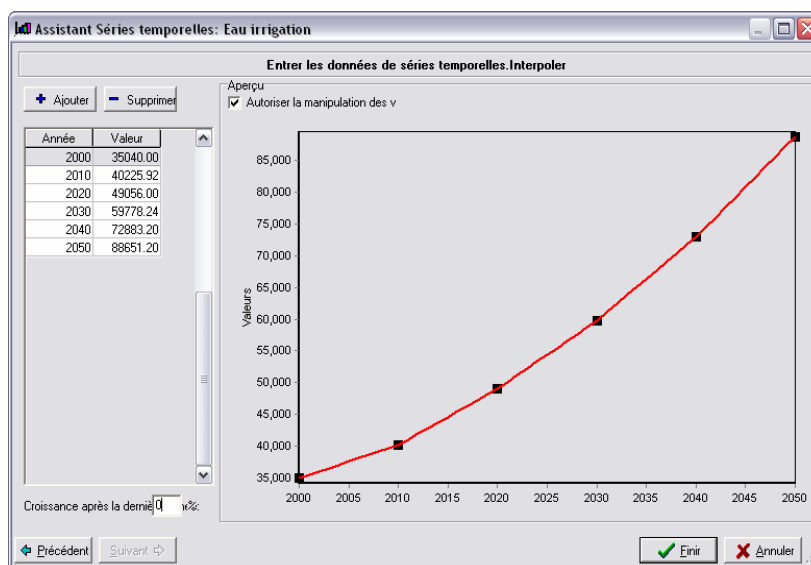
dont  $B_i$  : besoin en eau actuel ( $m^3/ha/an$ )

$Y_i$  : seuil de 2%

$n$  : nombre d'années comptés à partir de l'année de base

**Tab. 30: Taux d'utilisation de l'eau pour l'irrigation pour l'année future**

Année	besoins en eau
2000	35040,00
2010	40225.92
2020	49056.00
2030	59778.24
2040	72883.20
2050	88651.20



**Fig. 14: Fenêtre de donnée des séries temporelles des besoins en eau futurs pour l'irrigation**

On ramène le taux de croissance de la dernière année à 0%.

### ***ii. Application de la fonction pour le calcul du taux de croissance de la population***

Le taux de croissance de la population à 2.2% est ramené dans l'option « constructeur d'expression » fonction « Taux de croissance », puis utiliser l'hypothèse clé correspondante « Taux de croissance de la population pour l'année du scénario futur ».

### iii. Création d'un nouveau scénario pour modeler l'impact du taux de croissance élevé de la population

Un nouveau scénario devrait être créé pour évaluer l'impact d'un taux de croissance plus élevé que 2.2% pour la période 2001-2050. Pour évaluer et comparer le taux de croissance de la population si le taux de croissance augmente de 2.2% à 5.0%. On a un scénario « croissance élevée de population » (sc 2, Fig. 13).

### IV.2.3.3. Création du scénario « Méthode de l'année hydrologique »

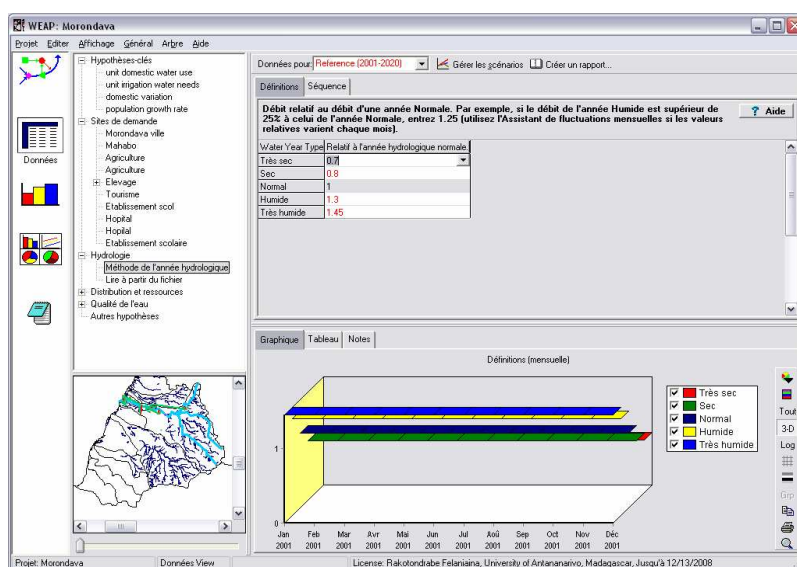
Le but est de définir différents régimes climatiques (très sec, sec, humide, très humide, normale,...) et de comparer avec une année normale en donnant une valeur entre 0.7 à 1.45 à chaque type de climat.

#### i. définition pour chaque type de climat

Le logiciel de simulation ne reconnaît que des valeurs numériques. Chaque type de climat doit porter une valeur numérique (Tab. 31, Fig. 15a) pour que le logiciel puisse faire la modélisation.

**Tab. 31: Définitions des types de climats**

Types de l'année	Chiffre correspondant
Très sec	0.7
Sec	0.8
Normal	1
Humide	1.3
Très humide	1.45



**Fig. 15a : Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique » définition de chaque type de climat**

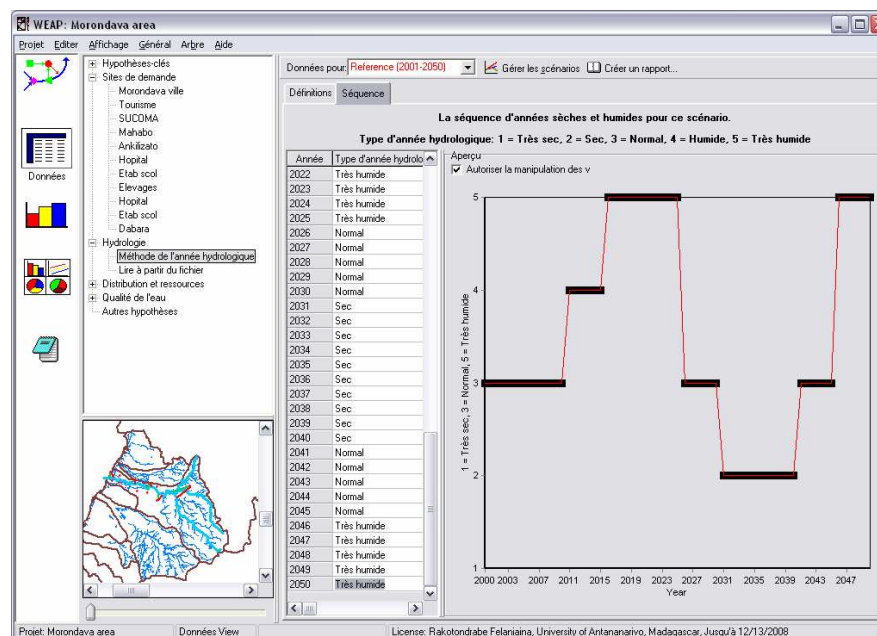
#### ii. Création d'une séquence climatique pour l'année à venir

La séquence climatique pour le scénario de l'année future est donnée à partir des études sur les données climatiques. La moyenne de 50 ans (56- 06) prise comme base de la définition des types de

l'année ci-dessous. (Tab. 32, Fig.15b). Les modèles de scénario des changements climatiques sont en annexe (Annexes 02 : I). En considérant que le débit d'une année normale, par exemple si le débit de l'année humide est supérieur à 25% par rapport à l'année normale, l'année est humide ainsi de suite »

**Tab. 32:** Répartition des types d'années

Année	Type d'année hydrologique
2000	Normal
2010	Normal
2015	Humide
2025	Très humide
2030	Normal
2040	Sec
2045	Normal
2050	Très humide



**Fig. 15b:** Fenêtre « Méthode de l'année hydrologique » avec la séquence des types d'année

### iii. scénario pour la méthode de l'année hydrologique (sc.3 Fig.16)

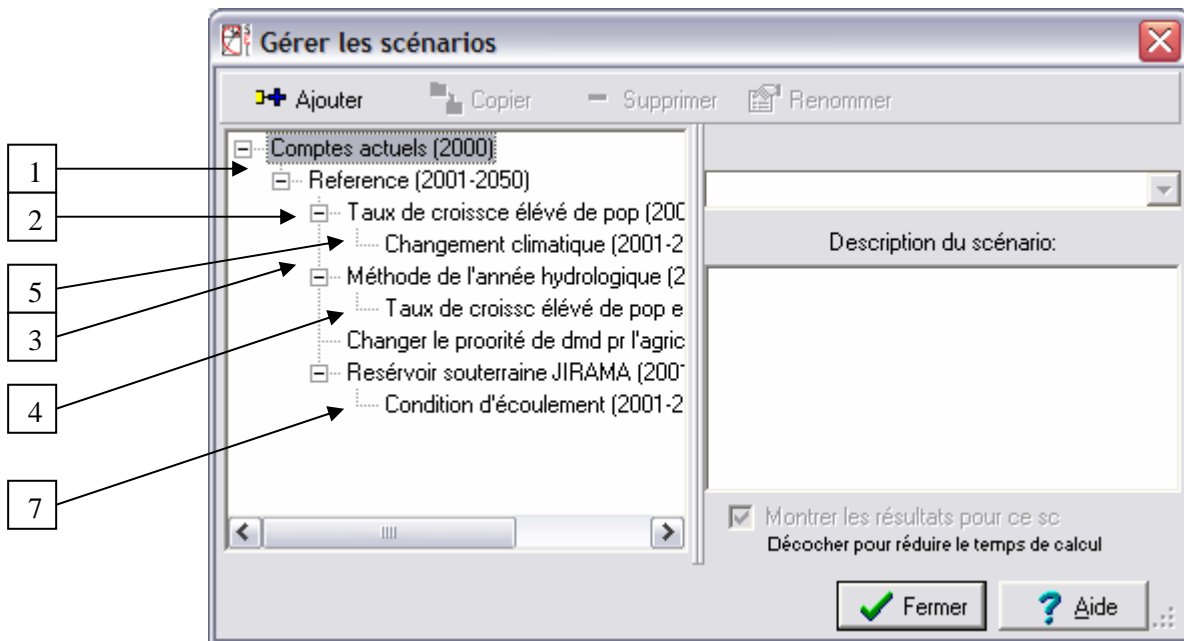
Le but de cette méthode est d'évaluer l'impact de la variation climatique sur les ressources en eau (précipitation, écoulements, recharges des nappes souterraines...) en rapport avec les besoins de l'utilisateur.

Après la création des séquences de l'année hydrologique, il faut changer le modèle en se basant sur la méthode de l'année hydrologique des ressources en eaux. Ce modèle nécessite de créer d'autres scénarios (Fig. 16) :



- scénario hérité de la méthode de l'année hydrologique « taux de croissance élevé et variable climatique » (sc4)
- scénario hérité de la référence nommé « changements climatique » (sc5)

Le but de tous ses scénarii est de pouvoir comparer les résultats et de voir l'évolution de l'offre et la demande.



**Fig. 16:** Fenêtre montrant les scénarios en méthode de l'année hydrologique

## **IV.2.4. Raffinage des demandes**

### **IV.2.4.1. Ajout des autres sites de demandes**

Les grandes villes, l'agriculture, rivières sont les sites que l'on place en premier. Après on ajoute les autres sites tels que l'élevage, établissement scolaire, tourisme, eaux souterraines, barrage, ....

### **IV.2.4.2. Priorités d'approvisionnement**

Il existe des liaisons entre les ressources et l'utilisateur suivant la priorité d'approvisionnement. On parle de débit de retour. Certaines d'entre elles devraient être créées suivant la priorité d'approvisionnement :

- une liaison de transmission à partir de l'emplacement urbain jusqu'à l'emplacement agricole pour un modèle conceptuel de réutilisation d'eau usagée urbaine dans l'agriculture
- des liens de débits de retour (eau usée) avec les emplacements des utilisations (urbain, industrie, élevage, agriculture) vers la rivière si on veut étudier la charge et la propagation des pollutions.

**Tab. 33 : Liaisons de transmission et débit de retour**

Liaison de transmission	Débit de retour
Rivière vers ville Rivière vers élevages Rivière vers agricultures Rivière vers industrie Jirama vers villes Jirama vers tourismes Jirama vers hôpitaux Jirama vers établissements scolaires	Villes vers rivières Industrie vers rivières Elevages vers rivières Agricultures vers rivières
Eaux souterraines vers villes Eaux souterraines vers hôpitaux vers établissement scolaire Villes vers agricultures	

La priorité d’approvisionnement pour l’utilisation peut être changée en créant un scénario nommé « changer la demande de priorité ». Ce scénario est hérité du scénario de référence et on peut changer la préférence d’approvisionnement 1 en 2 pour le compte actuel.

#### **IV.2.4.3. Ajout d’une condition d’écoulement**

La condition d’écoulement indique le sens de l’écoulement de la rivière. Cette condition d’écoulement a un scénario propre à elle-même (*Fig. 16 sc7*).

#### **IV.2.4.4. Modélisation des ressources en eaux souterraines**

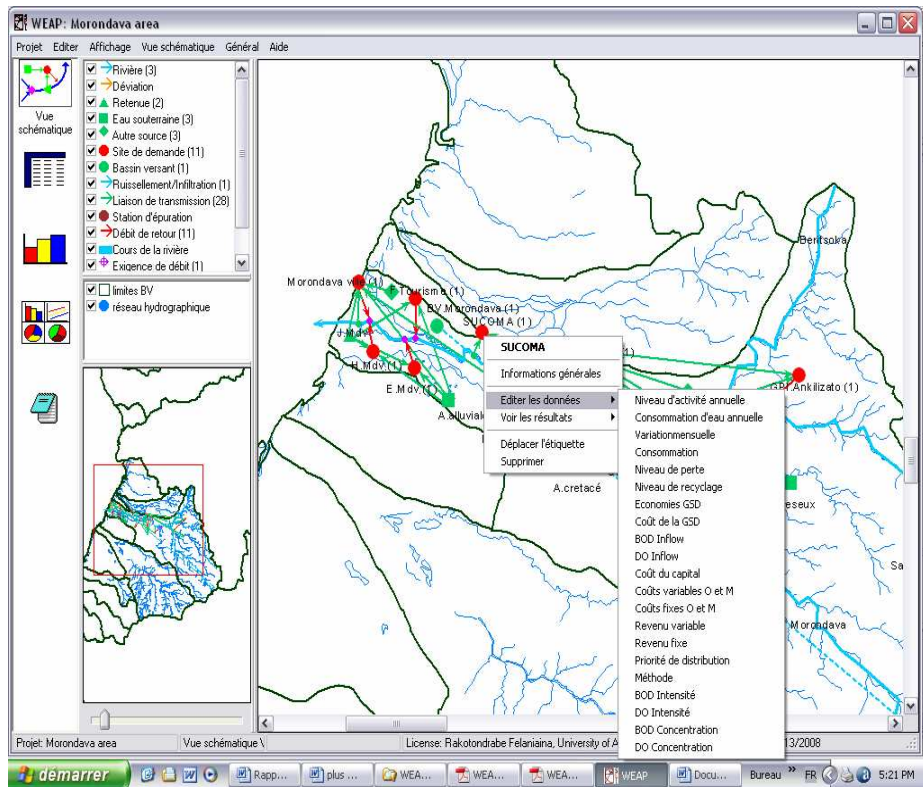
Les emplacements souterrains sont en connexion avec les sites de demandes (les hôpitaux, les établissements scolaires....).

### **IV.2.5. Saisie des données**

#### **IV.2.5.1. Saisie des éléments d’affichage cartographique**

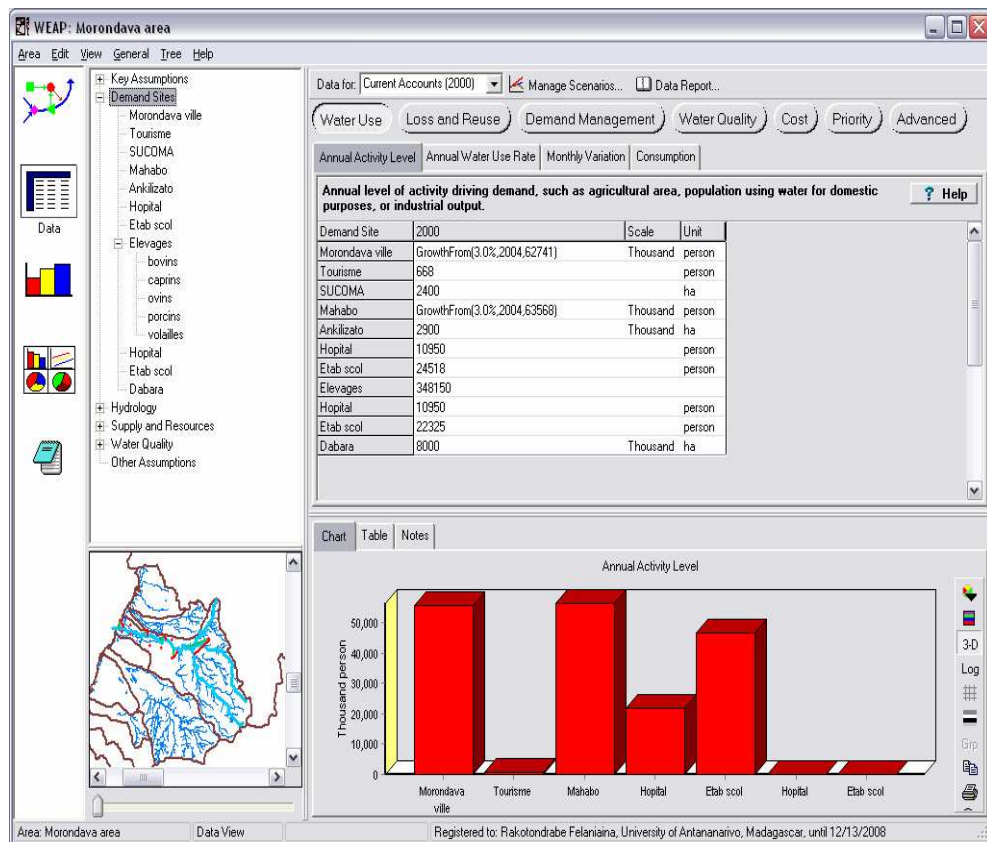
##### *i. Les sites de demandes (les utilisateurs d’eau)*

Avec un clic droit sur l’un des éléments des sites de demandes numérisées dans la carte de la zone, une fenêtre de dialogue apparaît avec tous les détails des informations nécessaires. En cliquant sur l’un de ces informations nécessaires, on peut passer directement dans l’affichage de la base des données puis faire la saisie des données (*Fig. 17*).

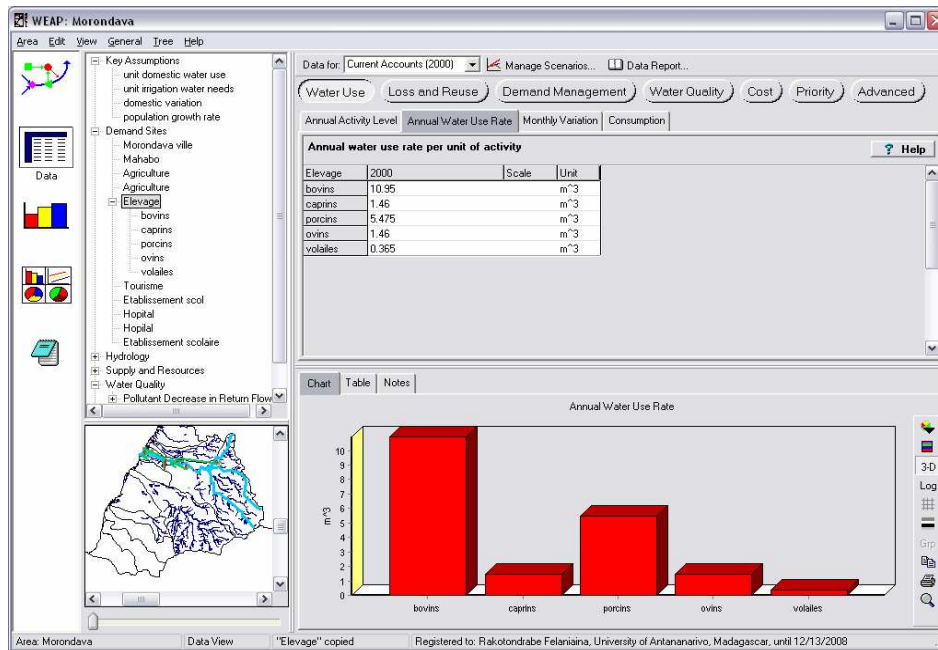


**Fig. 17 :** Fenêtre mode d'entre des donnes

Les figures ci-dessous (*Fig. 18,19*) montrent les exemples de présentation des données des sites de demandes et du graphe correspondant.



**Fig. 18:** Fenêtre « Sites de demandes » avec les données et graphes



**Fig. 19:** Fenêtre « Sites de demandes » et les besoins en eau secteurs élevages

### ii. La captation

La captation ou bassin versant fait partie de la branche étude hydrologique. Dès la création d'une captation sur la carte, une boîte de dialogue s'ouvre pour choisir une certaine option.

Le logiciel demande si l'écoulement de la captation contribue au débit de tête de la rivière et si le bassin est irrigué (si oui, la priorité de demande). Si l'irrigation est choisie pour une captation, des liens de transmission doivent être créés.

L'information générale sur le bassin versant est présentée par la figure ci-dessous (Fig. 20)

**Informations générales**

Bassin versant

Nom: BV.Morondava

Etiquette optionnelle pour la vue schématique (Utiliser pour passer à la ligne): BV.Morondava

Ruissellement vers: Morondava  Représente un débit de tête?

Infiltration vers: < Pas de débit vers r

Contient des surfaces irriguées?

Priorité de distribution: 1

Note: 1 est la plus grande priorité, 99 la plus petite

Aide Finir Annuler

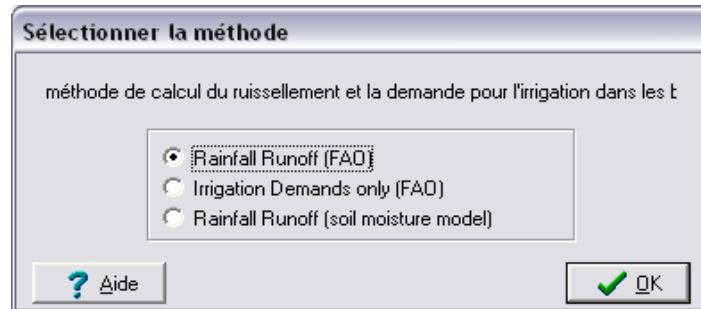
**Fig. 20:** Boîte à dialogue Information générale pour le Bassin versant.

Les données nécessaires concernant la captation sont:

- l'Occupation de sol : Surface, Kc, Précipitation effective
- le climat : P, ETRéf
- l'irrigation : irrigué

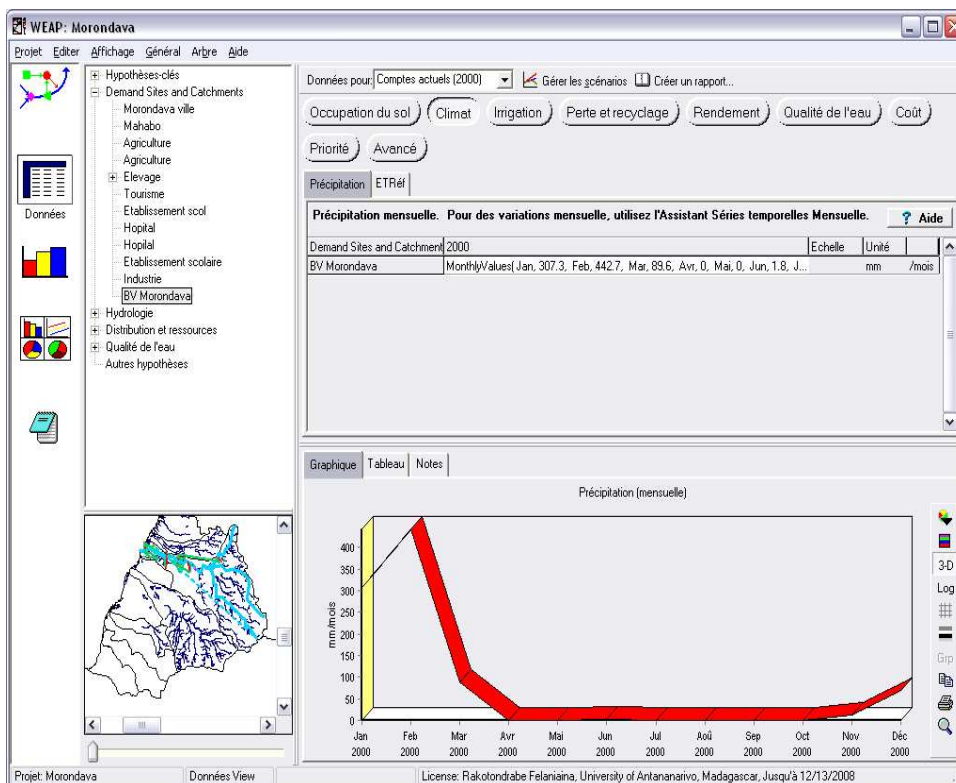
- la qualité de l'eau

Une méthode de calcul devrait être choisie (Fig. 21), la méthode de calcul du FAO ou Précipitation et Infiltration.

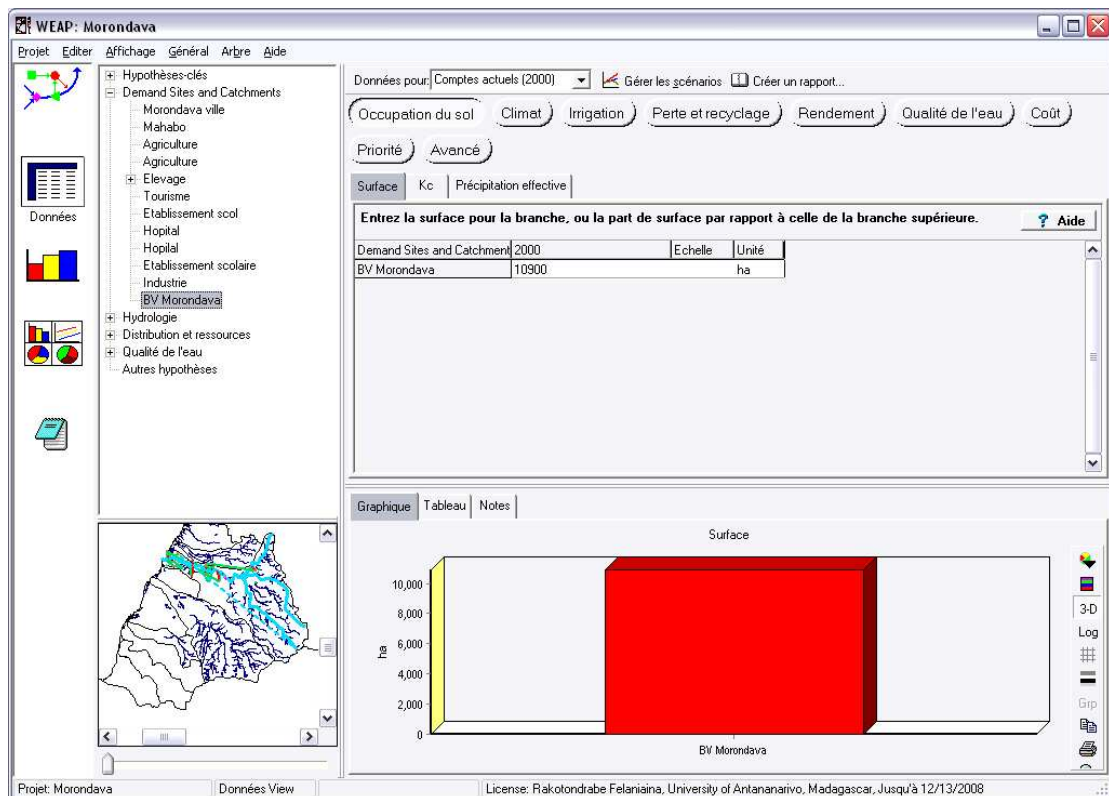


**Fig. 21:** Boite à dialogue pour choisir la méthode de calcul

Les figures ci-dessous (Fig. 22a et 22b) montrent deux exemples des informations et de représentation graphique correspondant à la branche climat du bassin.



**Fig. 22a:** Fenêtre des données représentant les précipitations mensuelles du bassin versant



**Fig. 22b: Fenêtre des données représentant la surface du bassin versant**

**iv. Les ressources et lieux de captage**

Ce sont les rivières, le barrage, les réservoirs, les eaux souterraines et les autres sources.

- rivières

Données nécessaires sont le débit de tête, longueur de bief, l'évaporation (*Tab. 23, page 45*)

- barrage

La saisie des données sur l'emplacement du barrage se fait dans le lien suivant :

Rivière

↳ Morondava

↳ Exigence de débit

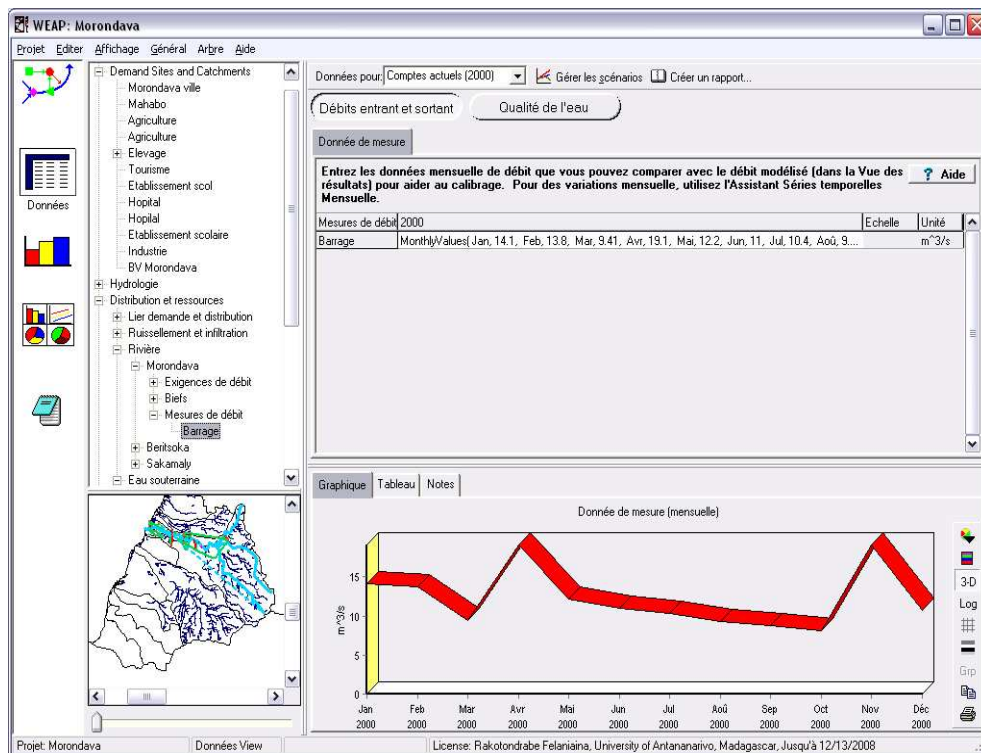
↳ Bief

↳ Mesure de débit

↳ **Barrage**

Les données mensuelles de débits mesurés au niveau du barrage et la représentation graphique du débit sont représentés dans la figure ci-dessous (*Fig. 23*)

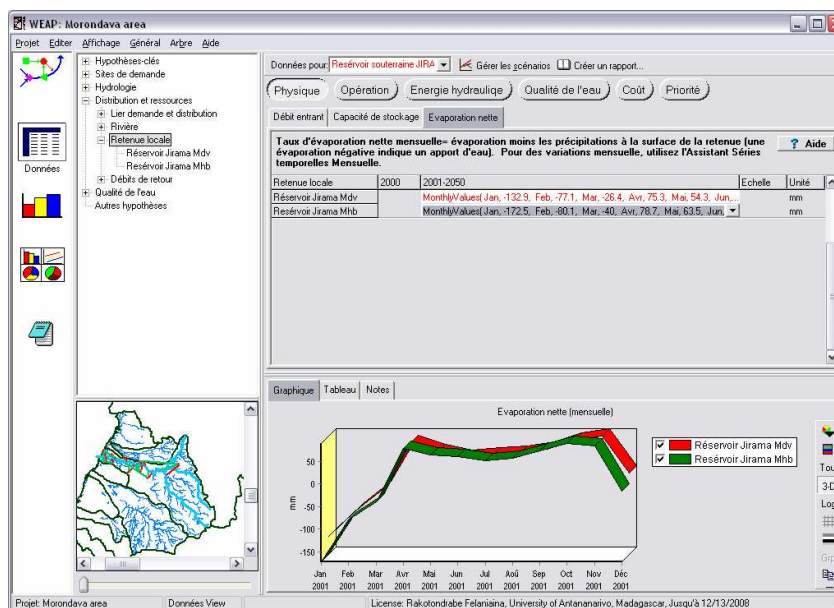




**Fig. 23: Fenêtre débit sur le barrage**

- réservoir

Pour les retenues locales ou réservoirs (JIRAMA), après la saisie et traitements des données concernant le débit entrant, la capacité de stockage, l'évaporation nette des réservoirs de Mahabo et Morondava (*Tab. 25a, 25b, page.48*). On peut avoir les représentations graphiques des informations sur le réservoir (*Fig. 24*).

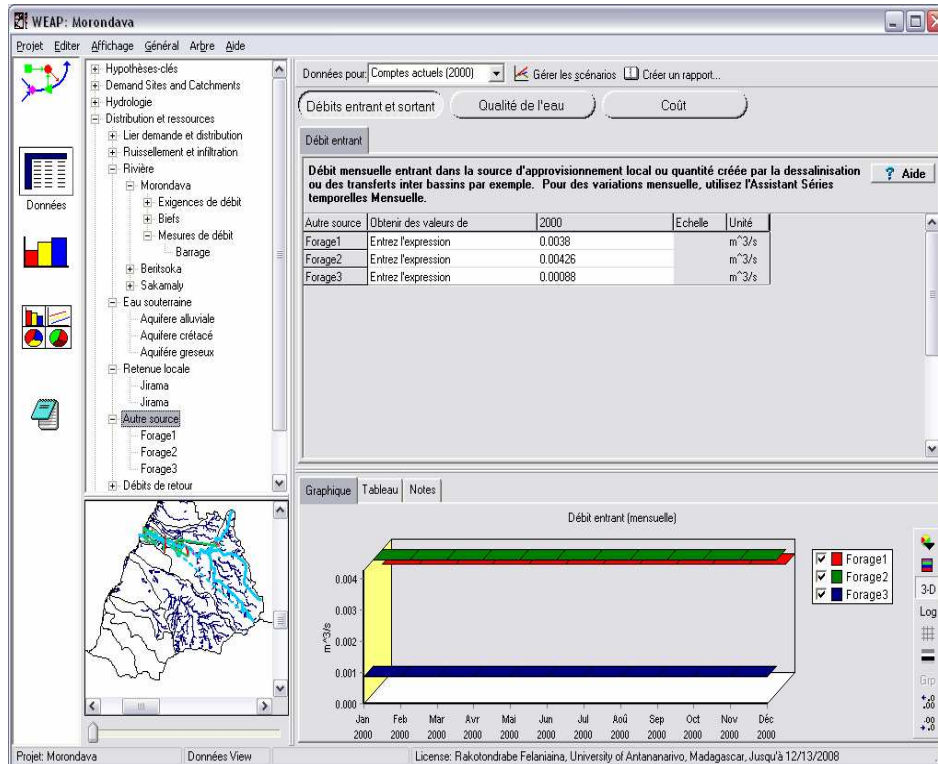


**Fig. 24: Fenêtre informations sur les réservoirs de la JIRAMA Morondava et Mahabo**

- eaux souterraines et autres sources

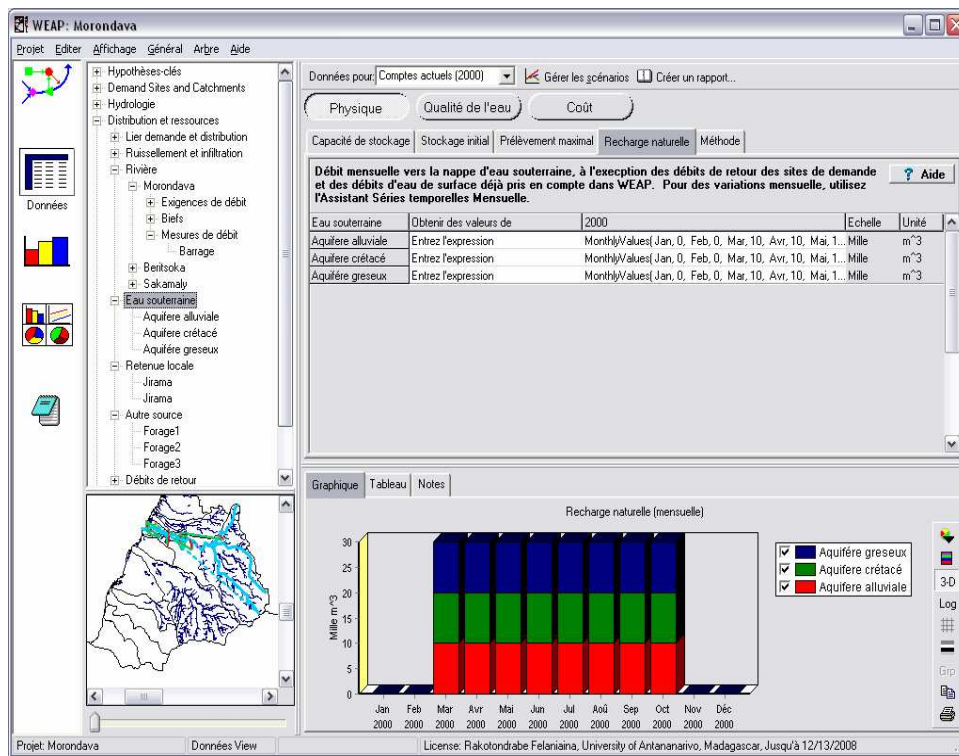
Concernant les eaux souterraines et les autres sources, à part les données physiques comme le débit, la capacité de stockage, ... (Tab. 24, page. 47), on peut ajouter les données sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau tels que le pH, la température, la minéralisation, ...

Les figures ci-dessous montrent les informations sur ces ressources (Fig. 25 et Fig. 26).



**Fig. 25: Fenêtre débit entrant pour les autres sources**





**Fig. 26:** Fenêtre montrant les recharges naturelles des aquifères

#### IV.2.4.2. Modélisation de la qualité de l'eau

##### i. Création d'un ensemble de polluants

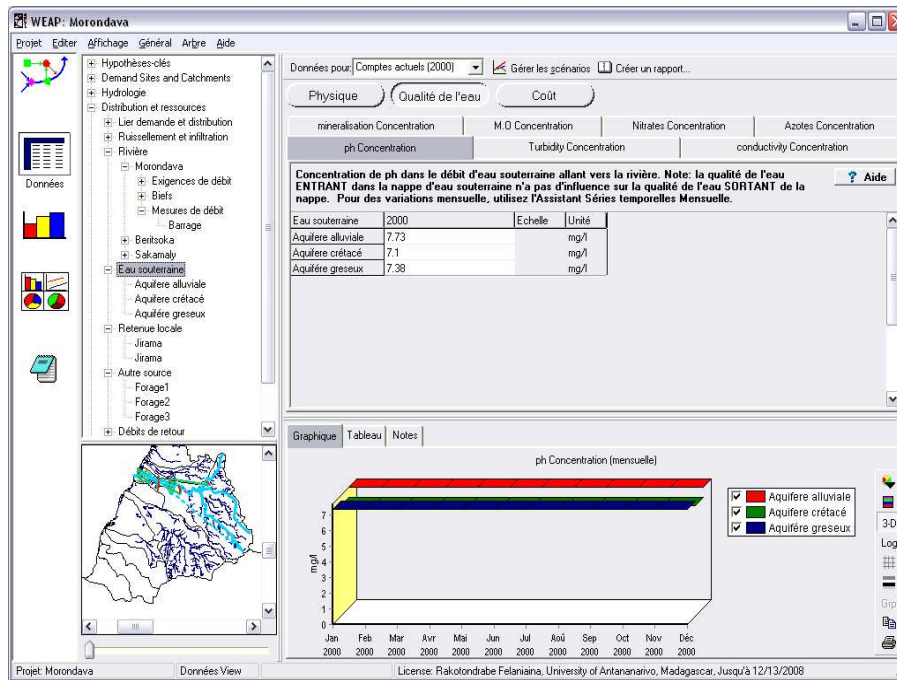
Pour faire une modélisation de la qualité de l'eau, il faut créer l'ensemble de polluants à modéliser. Il est préférable de choisir des indicateurs de pollution. Pour cette modélisation, passer dans menu Général puis sur les éléments de la qualité de l'eau (Fig. 27a).

Nom	Echelle	Unité de charge	Concentration	Calculer par	Taux de dégradation (par jour)	Note
Temperature		Celsius	Celsius			Entered as data for each reach
ph		Milligramme	milligramme/litre	Conservatif (pas de dégrad		acid and basic
Turbidity		Milligramme	NTU	Conservatif (pas de dégrad		parametre physico-chimiqua
conductivity		Milligramme	µS/cm	Conservatif (pas de dégrad		parametr physico-chimique
mineralisation		Milligramme	milligramme/litre	Conservatif (pas de dégrad		salt
M.O		Milligramme	milligramme/litre	Conservatif (pas de dégrad		élément indiquant la pollution
Nitrates		Milligramme	milligramme/litre	Conservatif (pas de dégrad		éléments indiquant la pollution
Azotes		Milligramme	milligramme/litre	Conservatif (pas de dégrad		élément indiquant la pollution

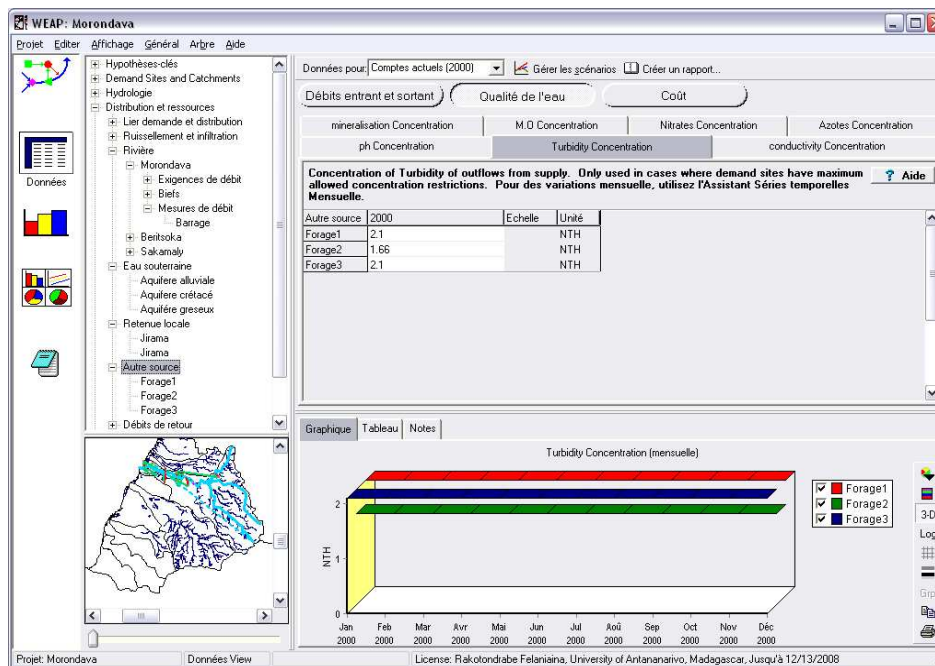
**Fig. 27a:** Eléments de la qualité de l'eau

##### ii. Saisie des données sur la qualité de l'eau

On saisit les données dans la base de données/distribution et ressources/eau souterraines. En cliquant sur la branche « qualité de l'eau ». On suit la même procédure pour toutes les ressources. Les figures ci-dessous montrent quelques fenêtres concernant la qualité des eaux (Fig. 27b et Fig.28).



**Fig. 28b:** Fenêtre qualité de l'eau (pH) pour l'eau souterraine



**Fig. 29 :** Fenêtre qualité de l'eau (turbidité) pour les autres sources

### iii. Saisie des données sur les qualités de l'eau pour les sites de demandes (les utilisateurs)

Les emplacements de demande peuvent exiger que son approvisionnement en eau réponde à certains critères de qualité c'est-à-dire la norme de concentration maximum allouée pour l'eau potable (*Annexe 01bis : Norme OMS*), un nouveau scénario hérité du scénario de "référence" appelée "contraintes d'apport de qualité de l'eau de la ville" devrait être créé pour évaluer le degré de pollution.

**PARTIE V**

RESULTATS

ET INTERPRETATIONS



Les zones de transmission ou zones d'alimentation et les utilisateurs sont reliés par une flèche verte. Après utilisation, les excès d'eau supposés déversés dans la rivière sont indiqués avec des flèches rouges.

En ne considérant que les principales ressources, on identifie comme ressources :

- une rivière : la Morondava
- deux retenues ou réservoirs : à Morondava et à Mahabo
- trois nappes d'eaux souterraines
- et trois autres ressources.

Comme sites de demande, on a distingué onze sites.

## **V.2. RESSOURCES EN EAU DU BASSIN**

### **V.2.1. Disponibilité en quantité des ressources en eau existantes**

Les ressources sont constituées par les eaux souterraines, l'eau de surface, l'évapotranspiration et l'eau de pluie. Pour évaluer leurs quantités, nous analysons les résultats donnés par l'option « Distributions des ressources » et au niveau du « Bassin versant » dans l'affichage des résultats.

#### **V.2.1.1 Eaux souterraines et vulnérabilité**

Les eaux souterraines assurent la grande partie de l'alimentation en eau potable dans le bassin. Elles sont exploitées par la JIRAMA ainsi que pour les AEP villageoises. Les graphes ci-dessous (*Fig. 30*) montrent l'évolution des quantités d'eaux souterraines disponibles ou l'évolution des stockages d'eau dans les trois aquifères dans le bassin jusqu'à l'horizon 2050, avec une situation de référence ou sans changements climatiques et en tenant compte l'effet des changements.

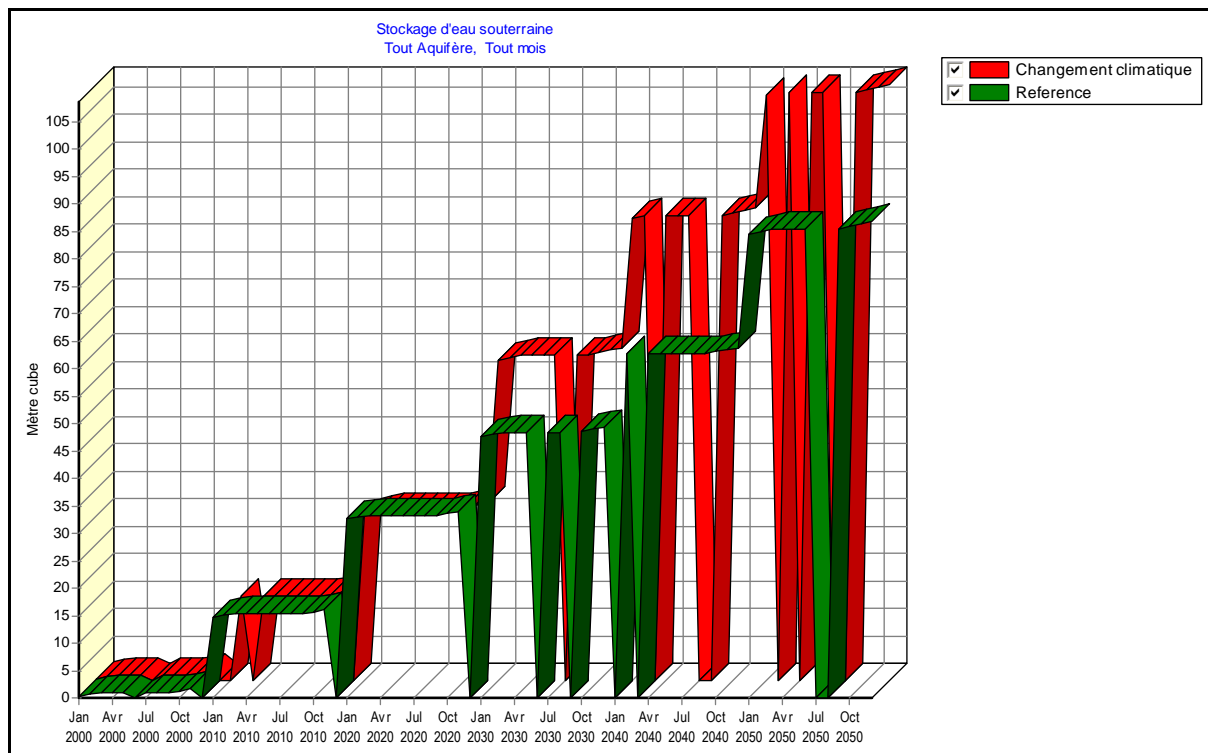
Le graphe montre que de 2000 – 2010, les stockages d'eaux souterraines évoluent de façon semblable pour les deux scénarios aux environs de  $20\text{m}^3$ . Ceci correspond à une année normale pour le scénario changements climatiques.

Déc 2020 à Jan 2030, les stockages paraissent encore identiques aux environs de  $35\text{m}^3$ . Mais on enregistre aussi une baisse de stockage du fait que les eaux souterraines sont fortement exploitées surtout en période d'étiage, il n'y a pas beaucoup d'infiltration.

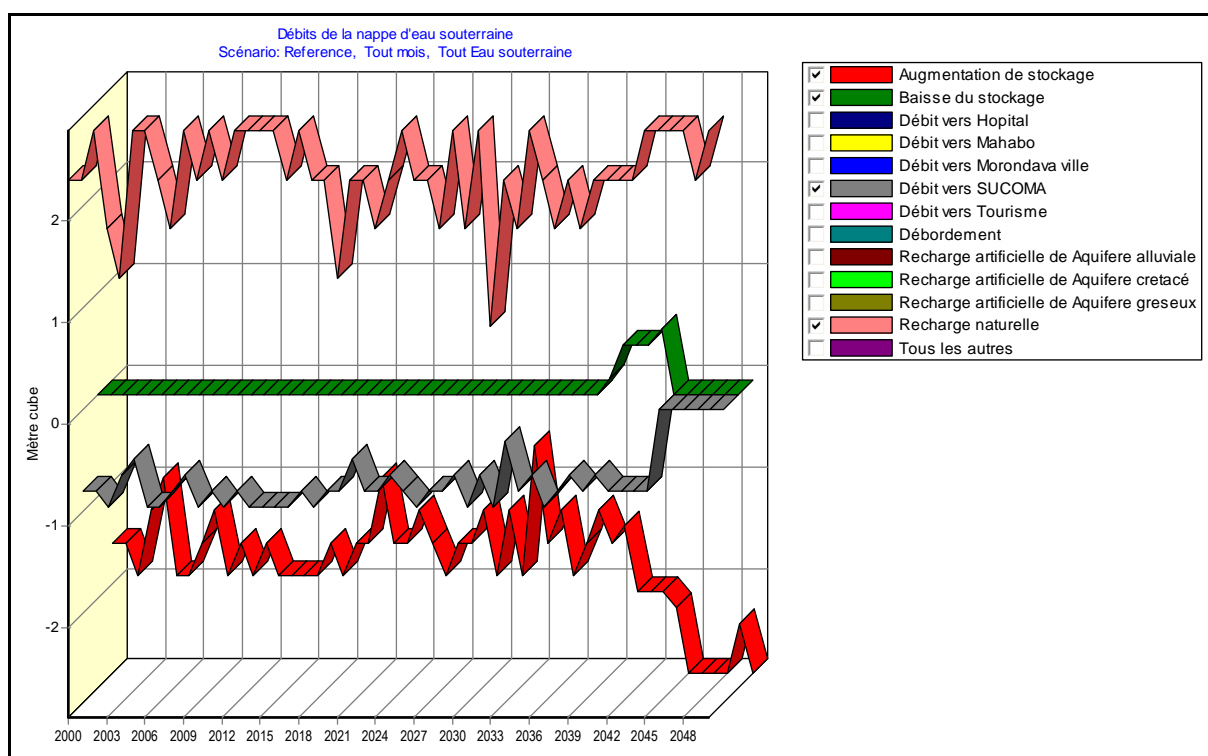
A partir de 2030, un grand changement apparaîtra au niveau des deux scénarios. Pour le « scénario de référence » : le stockage passe de  $35\text{m}^3$  à  $85\text{m}^3$ , par contre pour le « scénario changements climatiques » le stockage passe de  $35\text{m}^3$  à  $90\text{m}^3$  puis à  $110\text{m}^3$ .

Si le stockage augmente de  $35\text{m}^3$  à  $62\text{m}^3$  pour les années normales de 2026 à 2030 (pour le scénario changements climatiques) à l'année très humide 2050, le stockage sera estimé à  $110\text{m}^3$ .

De même pour les années sèches à partir de 2031 à 2040, on enregistre une baisse de stockage mais le taux de stockage atteint toujours  $95\text{m}^3$ .



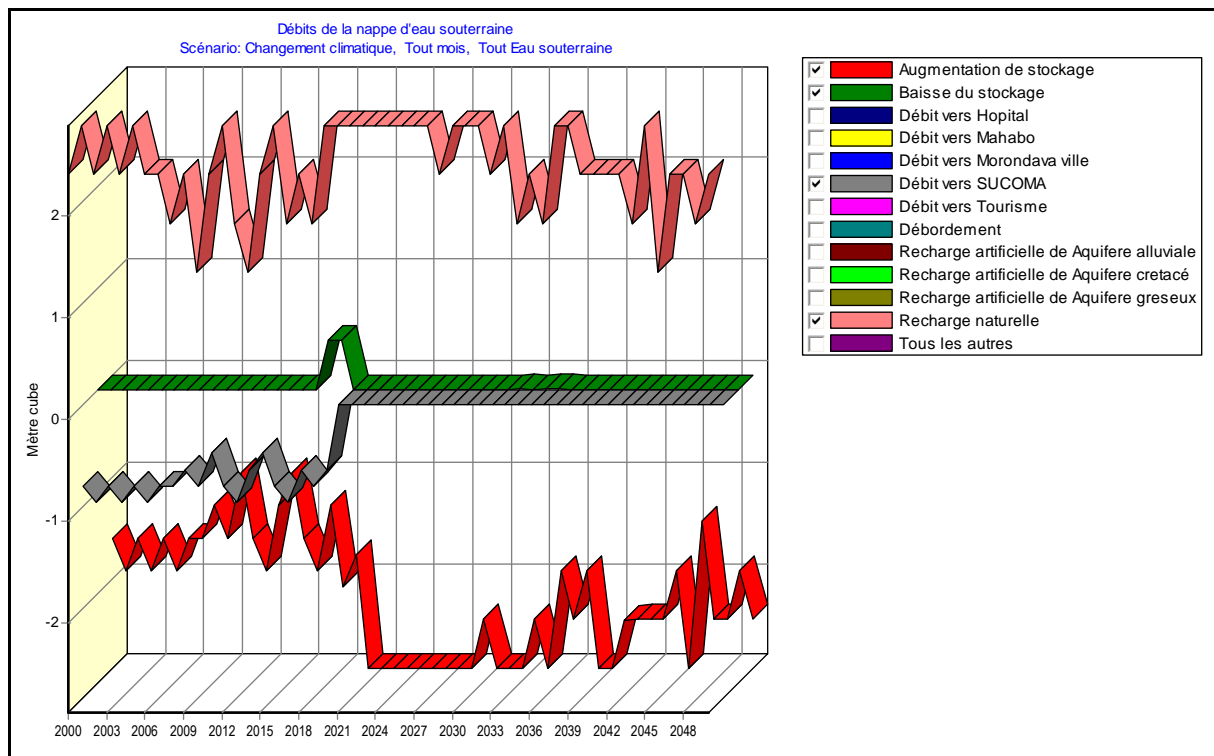
**Fig. 31: Evolution des stockages d'eaux souterraines jusqu'à 2050**



**Fig. 31: Débit entrant des eaux souterraines sc. référence**

Les figures (*Fig. 31 et 32*) montrent les débits entrants des eaux souterraines. Ces graphes nous ont permis d'analyser la variation de stockages, les vidanges et les recharges naturelles et artificielles des nappes.





**Fig. 32 : Débit entrant des eaux souterraines sc. changement climatique**

D'après ces deux graphes, on constate que :

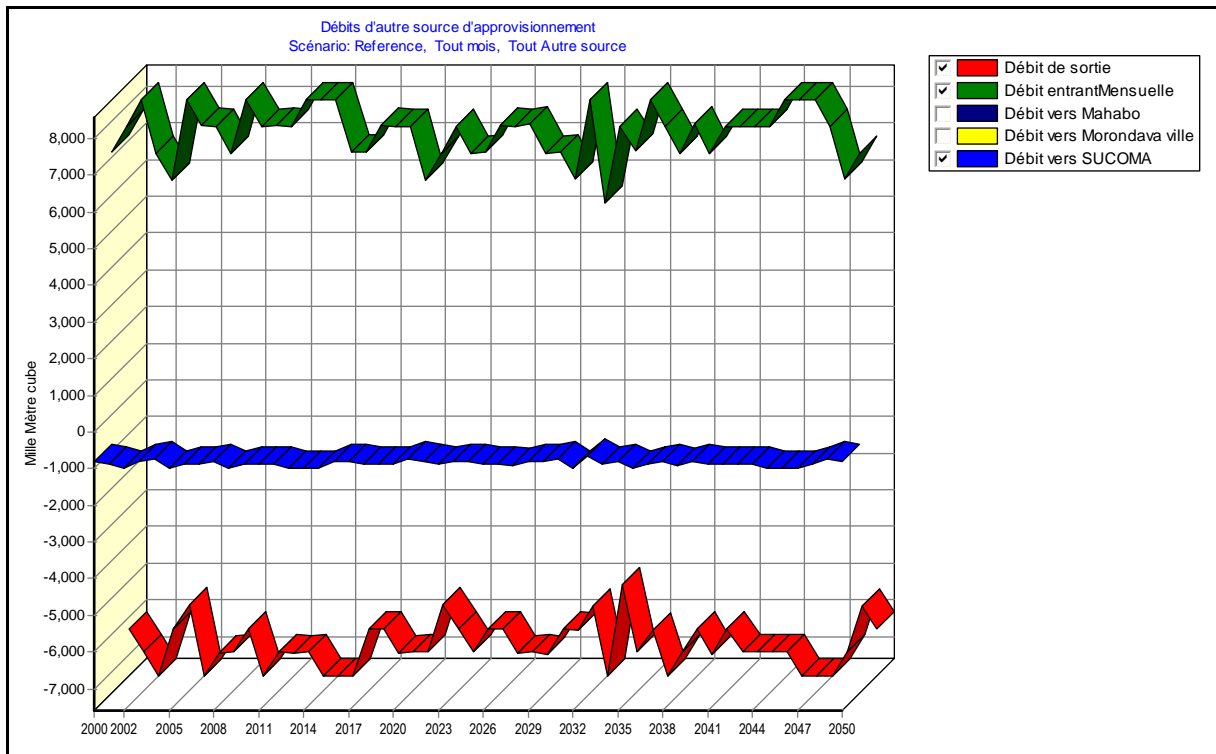
- pour le « scénario de référence » l'augmentation de stockage varie de  $-1,3 \text{ m}^3$  à  $-2,9 \text{ m}^3$ , par contre celui du « scénario changements climatiques » passe de  $-1,6 \text{ m}^3$  à  $-2,9 \text{ m}^3$ . Ce qui indique que le maximum restera toujours le même ( $-2,9 \text{ m}^3$ ) car il dépend de la formation géologique constituant l'aquifère invariable aux changements climatiques.

- pour les baisses de stockage, on enregistre une baisse très remarquable entre les années 2035 et 2040 pour la scénario de référence, pour le scénario changements climatiques : la baisse de stockage est prévue aux environs des années 2015 – 2020. Ceci correspondrait à des années humides.

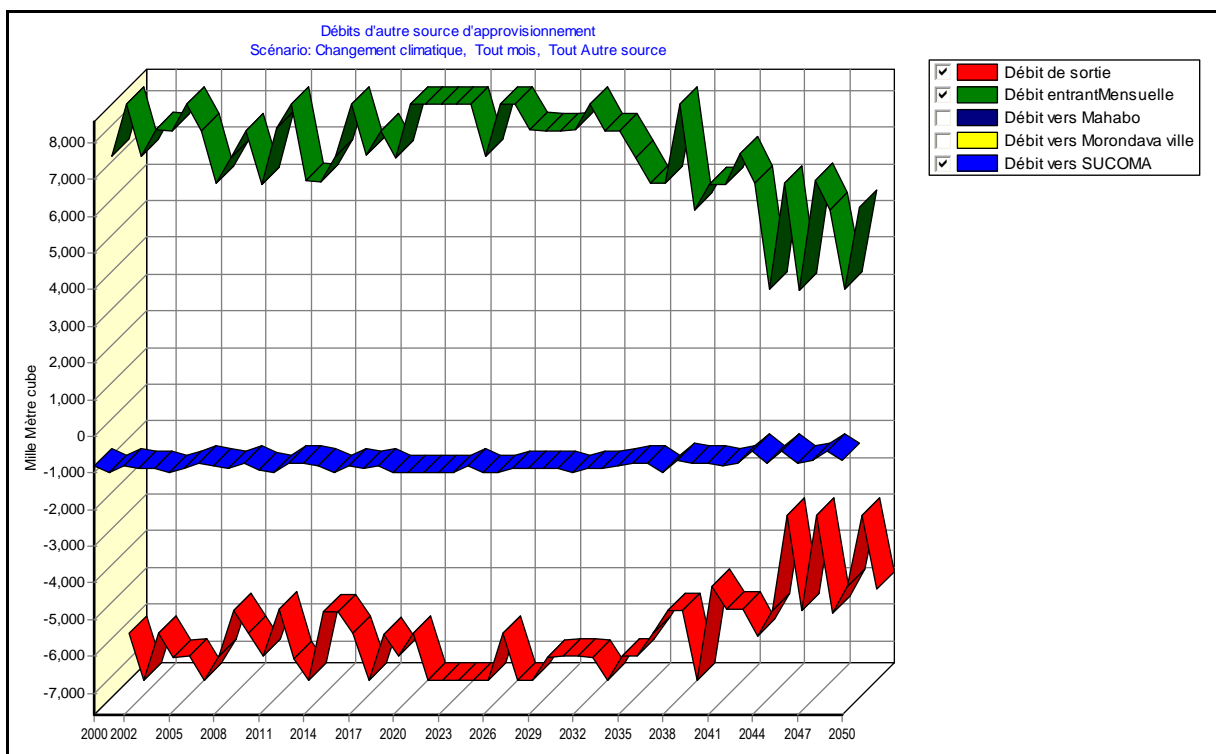
- pour les recharges, l'aquifère du bassin ne reçoit aucune recharge artificielle, par contre les recharges naturelles varient de  $1,9 \text{ m}^3$  à  $2,9 \text{ m}^3$  pour le scénario de référence et de  $1,4 \text{ m}^3$  à  $2,9 \text{ m}^3$  pour le scénario changements climatiques.

A propos des débits, seule l'industrie SUCOMA représente un « débit vers » assez important parmi tous les utilisateurs. Pour le scénario de référence, le débit varie de  $-0,6 \text{ m}^3$  à  $-1,0 \text{ m}^3$  entre 2000 et 2040 alors que pour le scénario changements climatiques, ce débit sera de  $-0,5 \text{ m}^3$  à  $-1,0 \text{ m}^3$  Pendant les années 2000 – 2015, il est fort possible que l'industrie SUCOMA ne manquera pas d'eau.

Les figures ci-dessous (*Fig. 33 et 34*) montrent les débits fournis par les autres ressources d'approvisionnement (forages pour AEP) et la vulnérabilité de ces autres ressources aux changements climatiques.



**Fig. 33:** Débit fourni par les autres ressources sc. référence



**Fig. 34:** Débit fourni par les autres sources d'approvisionnement sc. changements climatiques



En comparant ces deux graphes, on constate que la somme des débits de sortie et débit entrant mensuel pour le scénario de référence parait supérieure à celle des débits de sortie et débit entrant mensuel du scénario changements climatiques (Tab. 34 ci – dessous et plus de détail Annexes 03 : I.3)

**Tab. 34: Débits des autres sources d'approvisionnement en eau**

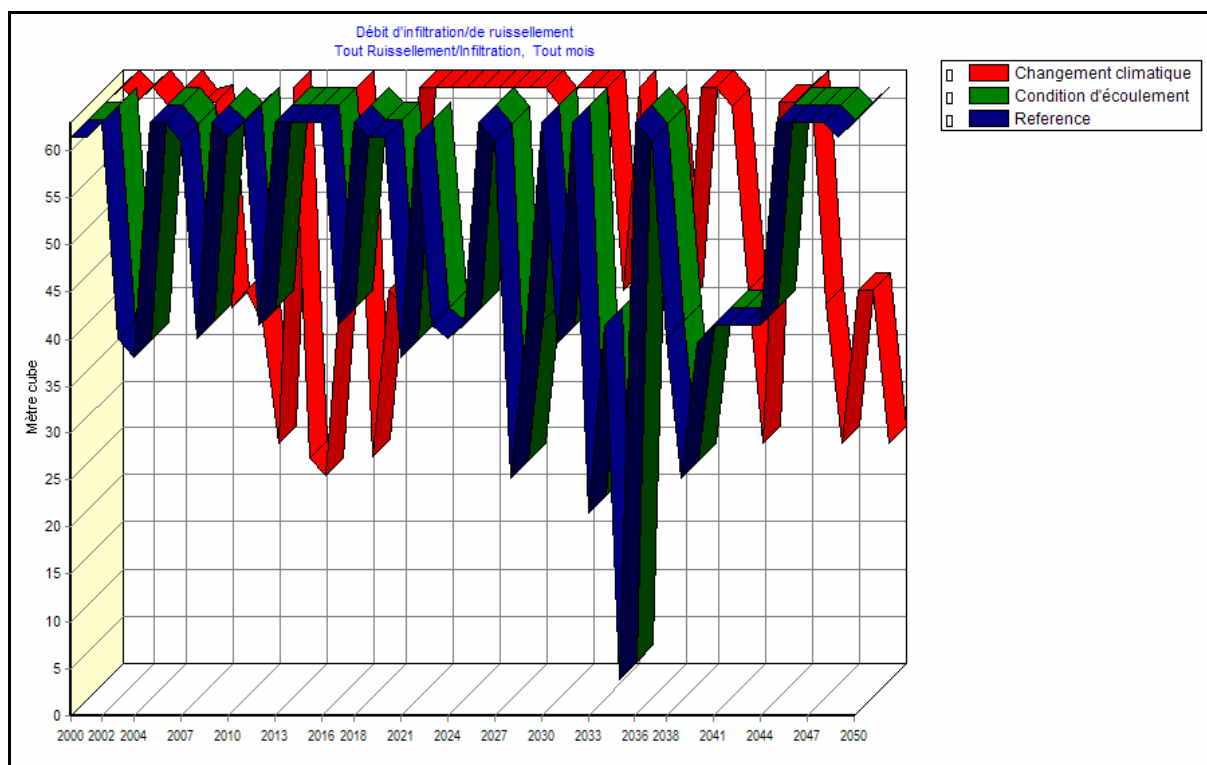
	Scénario de référence	Scénario changements climatiques
<b>Débit de sortie</b>	- 74710,8m <sup>3</sup>	- 69567,6m <sup>3</sup>
<b>Débit entrant mensuel</b>	84320,9m <sup>3</sup>	78516,2m <sup>3</sup>

Ce qui indique une diminution des ressources en eau pour l'année à venir, même si on enregistre un taux de recharges des aquifères et d'augmentation de stockages, ce volume semble insuffisant.

Ce même effet est observé au niveau du débit vers SUCOMA où le débit consommé pour l'année de référence est supérieur à celui qui sera consommé s'il y a changements climatiques.

### V.2.1.2. Taux d'infiltration et vulnérabilité

*Le ruissellement* alimente l'écoulement de surface matérialisé par les réseaux hydrographiques et les réservoirs d'eau souterraine par *infiltration efficace*.



**Fig. 35: Débit de ruissellement/infiltration**

Pour évaluer ces ressources nous avons introduit un autre scénario, le scénario pour la condition d'écoulement.

Pour les scénarii de référence et la condition d'écoulement, les résultats sont identiques. Par contre ceux de changements climatiques indiquent une différence.

Si le minimum est de  $3,8 \text{ m}^3$  en 2035 et le maximum  $63 \text{ m}^3$  en 2005, 2030, 2045, 2050 pour les deux scénarios, ceux du scénario de changements climatiques montrent que :

- en 2010 à 2015: une diminution de débit de ruissellement/infiltration de  $62 \text{ m}^3$  à  $38 \text{ m}^3$  correspondant à une année humide
- en 2030 à 2035: une diminution de débit de ruissellement/infiltration de  $62 \text{ m}^3$  à  $4 \text{ m}^3$  : équivalent à une année sèche
- en 2045 à 2050 aussi on enregistre une diminution de  $63 \text{ m}^3$  à  $25 \text{ m}^3$ , ce qui signifie une année très humide.

En conclusion, les changements climatiques des années humides en années très humides ne provoqueront pas systématiquement plus d'infiltrations puisque l'infiltration dépend aussi des autres facteurs comme la nature lithologique, la porosité, la perméabilité du sol et du sous sol, la couverture végétale, la topographie du bassin. Des données détaillées sont en annexes (Annexes 03: I.4).

### **V.2.1.3. Evapotranspiration et vulnérabilité**

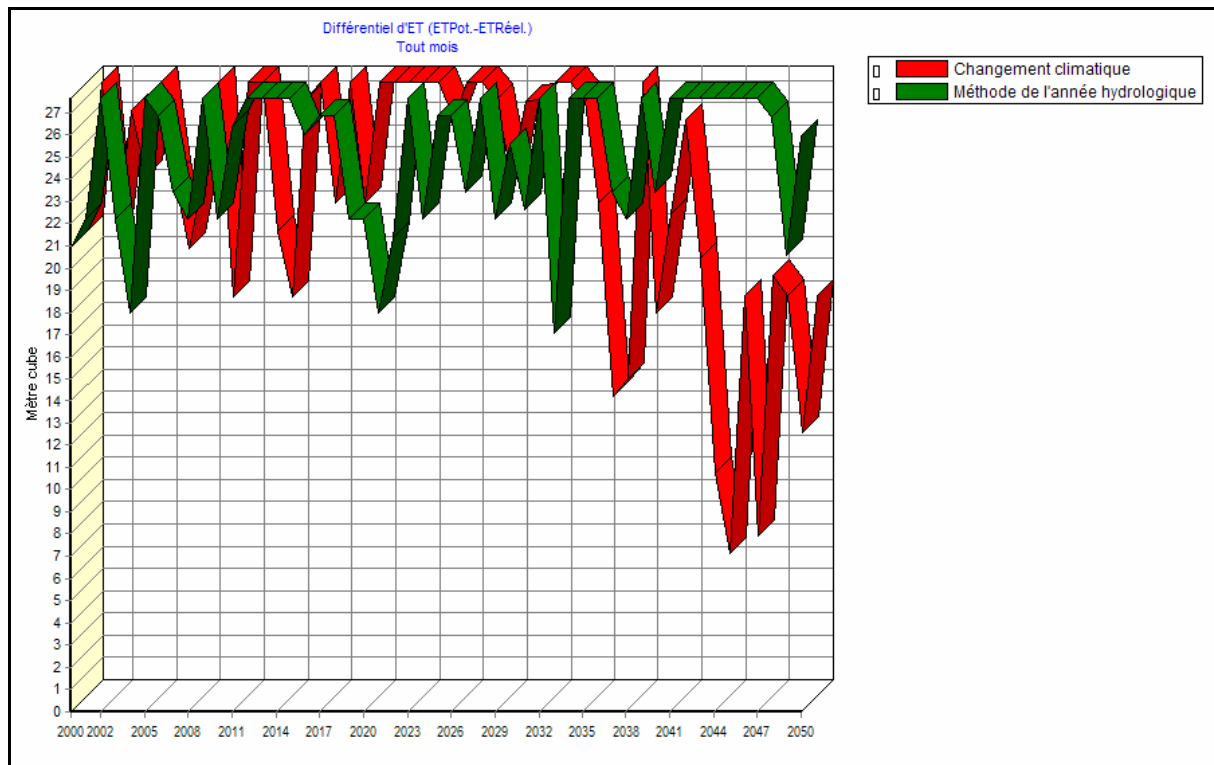
L'évapotranspiration constitue à la fois aussi une ressource en eau et perte car en terme de bilan il est une perte en terme de quantité il est une ressource car il constitue l'humidité de l'air qui est utilisable pour certaines plantes. Cette ressource est aussi vulnérable. Pour évaluer cet effet, nous allons analyser deux scénarios : scénario de changements climatiques et scénario de la méthode de l'année hydrologique qui a une fonction de référence.

Les deux graphes (*Fig. 36*) montrent que :

- pour les années 2000 – 2005 : l'évaporation est identique pour les deux scénarios,
- à partir de 2005 à 2015 : l'allure des graphes paraît identique sauf l'intensité de l'évaporation du scénario changements climatiques qui diminue de  $27,64 \text{ m}^3$  à  $26,87 \text{ m}^3$  pour le scénario méthode de l'année hydrologique, l'intensité est de  $27,64 \text{ m}^3$
- de 2015 à 2030, on enregistre une évapotranspiration moyenne de  $26,00 \text{ m}^3$  pour le scénario changements climatiques
- à partir de 2030 jusqu'à 2050 : on observe une forte diminution d'évapotranspiration de  $22,19 \text{ m}^3$  à  $18,05 \text{ m}^3$  toujours pour le scénario changements climatiques, par contre celle du scénario méthode de l'année hydrologique ne connaît aucune baisse d'évapotranspiration.

Ceci permet de conclure que s'il y a des changements climatiques, le taux d'évapotranspiration pourra varier, les graphes ci – dessous (*Fig. 36*) montrent cet effet. De même la comparaison de la somme de l'évapotranspiration pour le scénario changements climatiques et scénario méthode de

l'année hydrologique indique par exemple une diminution. On constate qu'en scénario changements climatiques l'évaporation est de  $253,87 \text{ m}^3$  et en scénario méthode de l'Année hydrologique, elle est de  $277,69 \text{ m}^3$ . Les détails des informations sont donnés en annexe (*Annexe 03 : I.5*).



**Fig. 36: Evolution de l'évapotranspiration**

#### V.2.1.4. Eau de surface et vulnérabilité

L'eau de surface dans le bassin est employée en grande partie pour l'agriculture et l'industrie. Elle est aussi vulnérable vis-à-vis des changements climatiques comme les autres ressources en eau. La figure ci – dessous (*Fig. 37*) montre les graphes correspondants.

Les données numériques sont données en annexe (*Annexe 03 : I.6*).

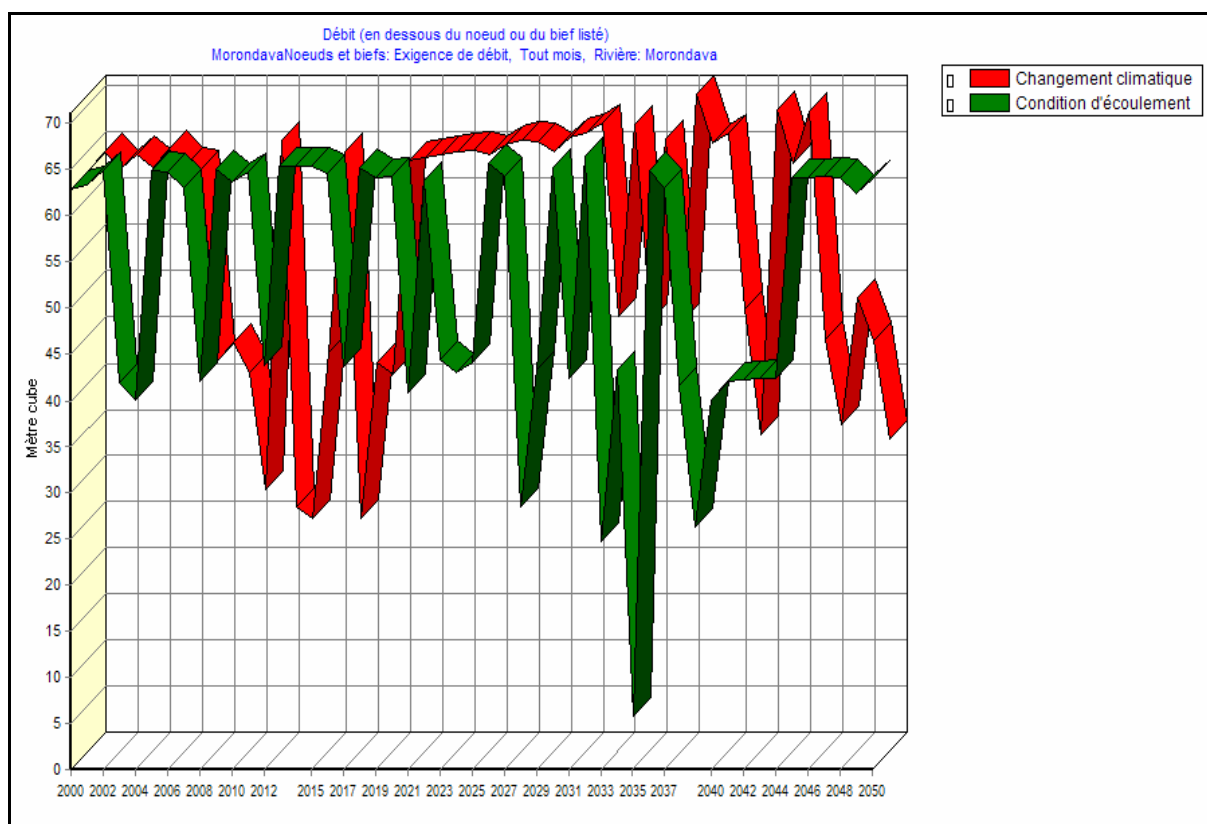
Pour étudier cette vulnérabilité, nous avons établi deux scénarios :

- « scénario changements climatiques »
- « scénario condition d'écoulement » qui sert comme scénario de référence.

Après analyse des résultats obtenus à partir de ces deux scénarios, nous pouvons dire que :

- s'il y a changement climatique, on enregistre une augmentation de débit de la rivière avec un minimum de l'ordre de  $33,78 \text{ m}^3$  en 2050 et un maximum de  $69,26 \text{ m}^3$  environ en 2045 qui sera une année normale,
- par contre, celui du scénario condition d'écoulement présentera un débit moyen de  $64 \text{ m}^3$  avec un très bas débit de  $5,69 \text{ m}^3$  en 2035.

Nous pouvons avancer qu'il est probable qu'une grande partie des eaux souterraines dans la région alimente le réseau de surface si le maximum de débit ne se trouve que pendant l'année normale.



**Fig. 37:** Evolution des débits d'eau de surface

## V.2.2. Disponibilité en qualité des ressources en eau existantes

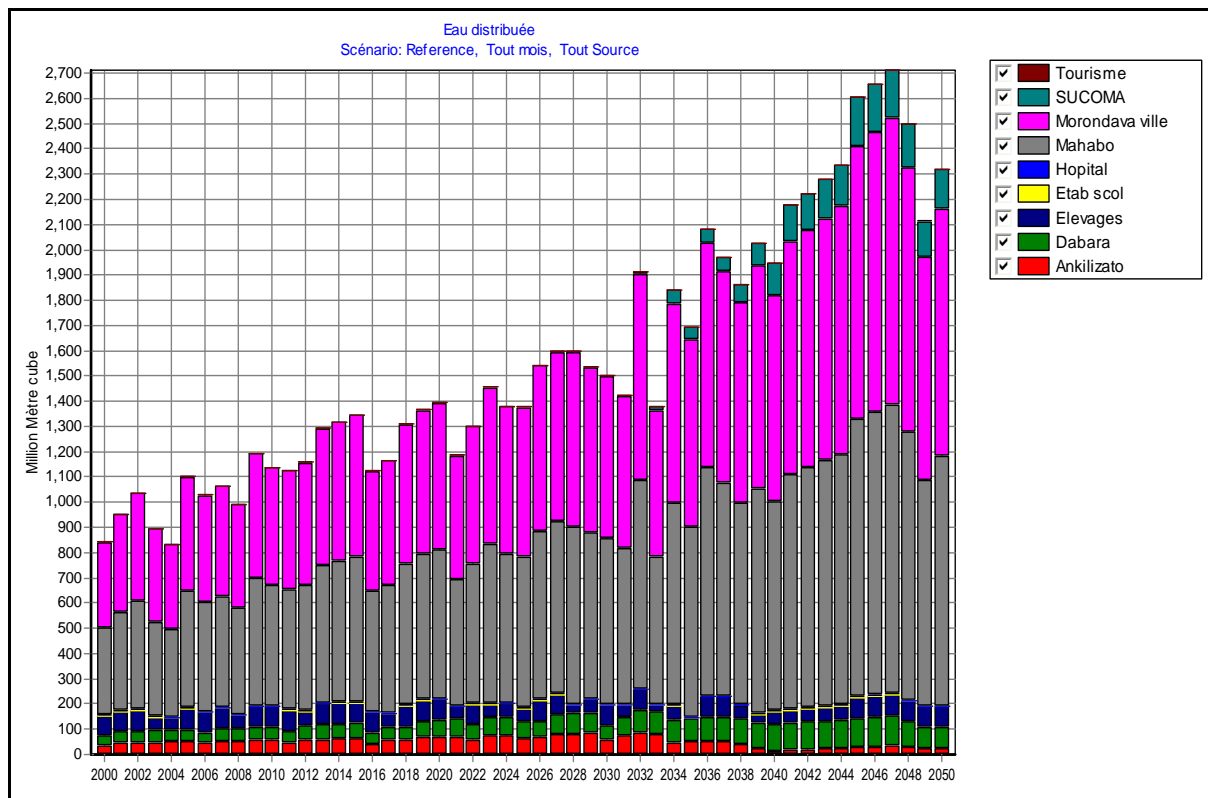
Faute des séries de données chimiques, on a réservé en perspective cette étude.

## V.3. DEMANDES OU BESOINS EN EAU

### V.3.1. L'eau distribuée pour tous les sites de demandes pour l'horizon 2001-2050

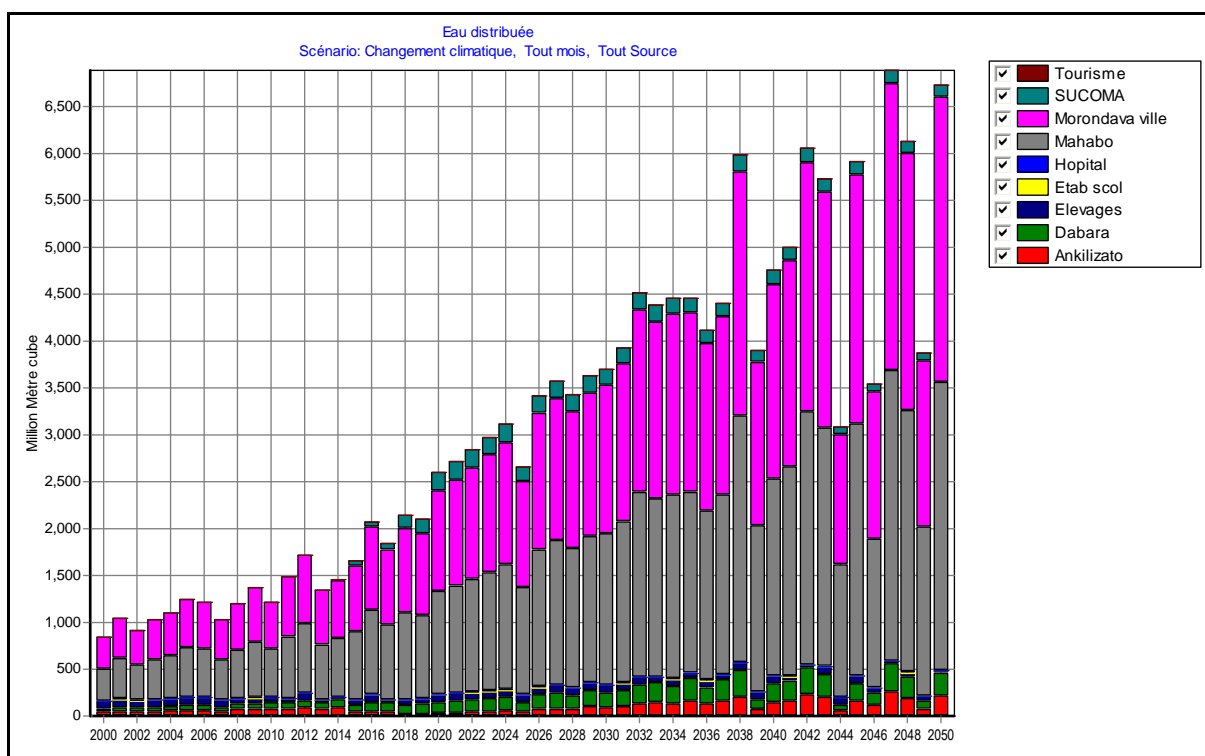
Les graphes ci – dessous (*Fig. 38, 39, 40*) montrent la quantité d'eau et l'évolution des eaux distribuées pour chaque site de demandes pour le scénario de références et le scénario de changements climatiques.

Cette eau distribuée connaîtra une variation au niveau des emplacements urbains, agricultures, élevages, industries. Pour les autres sites, cette variation n'est pas très remarquable (*Fig. 38 et 39*). Les données numériques sont présentées en annexe (*Annexes 03 : II-1*).



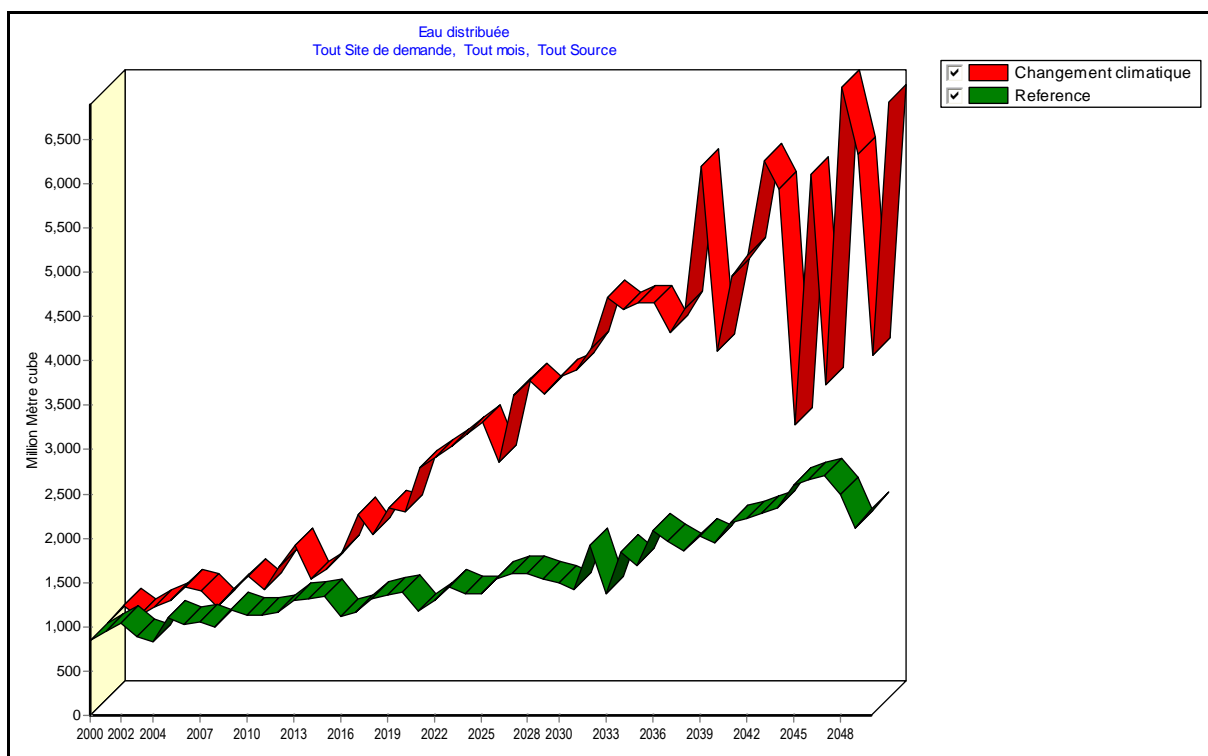
**Fig. 38:** Eau distribuée à chaque site de demande scénario de référence

L'eau distribuée par ces emplacements provient des aquifères exploitées par la JIRAMA et par le forage ainsi que la rivière de Morondava.



**Fig. 39:** Eau distribuée à chaque site de demandes scénario changements climatiques

La comparaison des deux scénarii (Fig. 40) montre que l'eau distribuée va augmenter de 800 millions de m<sup>3</sup> à 2 400 millions de m<sup>3</sup> jusqu' à 2050 si on ne tient pas compte des changements climatiques.



**Fig.40: Eau distribuée en scénario de référence et changements climatiques**

Par contre, s'il y a changements climatiques cette augmentation ira d'étape en étape :

- de 2000 à 2010 : l'eau distribuée sera à peu près la même pour les deux scénarios ceci équivaut à une année normale

- de 2010 à 2020 : si pour le scénario changements climatiques cette eau distribuée passe de 1 200 millions de m<sup>3</sup> à 1 600 millions de m<sup>3</sup> celle du scénario de référence reste en moyenne de 1 500 millions de m<sup>3</sup> et le volume maximum sera atteinte en 2050 avec 2 500 millions de m<sup>3</sup>. Pour le scénario changements climatiques de 2025 à 2050, l'eau distribuée atteindra environ 600 millions de m<sup>3</sup>. Ceci a pour cause l'augmentation des demandes (augmentation de population, surfaces irrigables, ...) alors que les ressources vont subir aussi une modification dû à ce changement de climat.

### **V.3.2 Débit du site de demandes pour l'horizon 2001-2050**

Les graphes ci- dessous (Fig. 41) montre les débits entrants pour chaque site de demandes venant de toutes les sources ainsi que les consommations ; les scénarios utilisés pour évaluer ces résultats sont les scénario changements climatiques et scénario de référence.

Le débit consommé est divisé en deux parties :

- les débits consommés par les besoins domestiques, élevages, touristes, établissements

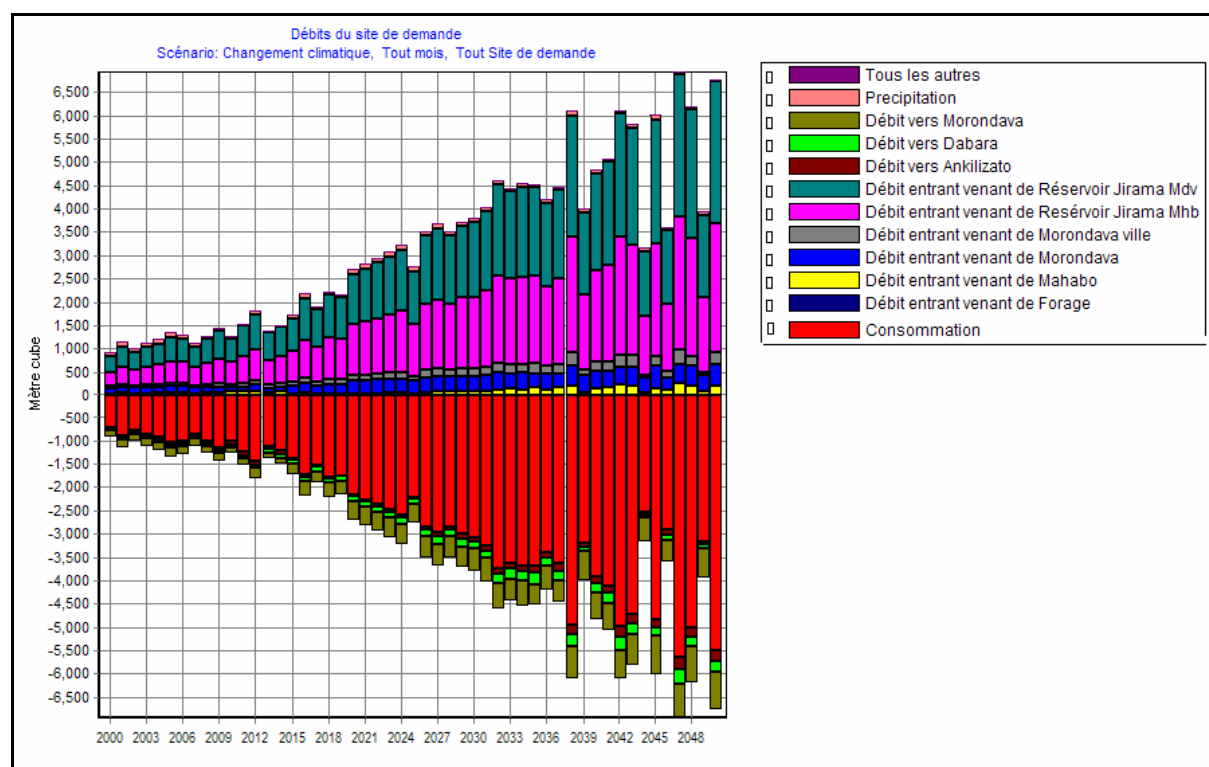
Scolaires, établissements hospitaliers...

- les débits consommés par les GPI (Grand périmètre irrigué tel que Dabara et Ankilizato) qui sont extraits directement de la rivière de Morondava.

Pour l'ensemble des deux scénarios, les débits entrants sont tous consommés directement à part la précipitation.

Pour un éventuel changement climatique (Fig. 41), on constate que le débit entrant venant des sources d'approvisionnements (JIRAMA) ne cessera pas d'augmenter jusqu'aux environs de 2035. Ces effets sont aussi observés au niveau de la consommation. En même temps, on observe aussi une diminution vers les années 2036 à 2040. Ceci correspond à une année sèche. Pour la consommation, cette baisse est aussi observée.

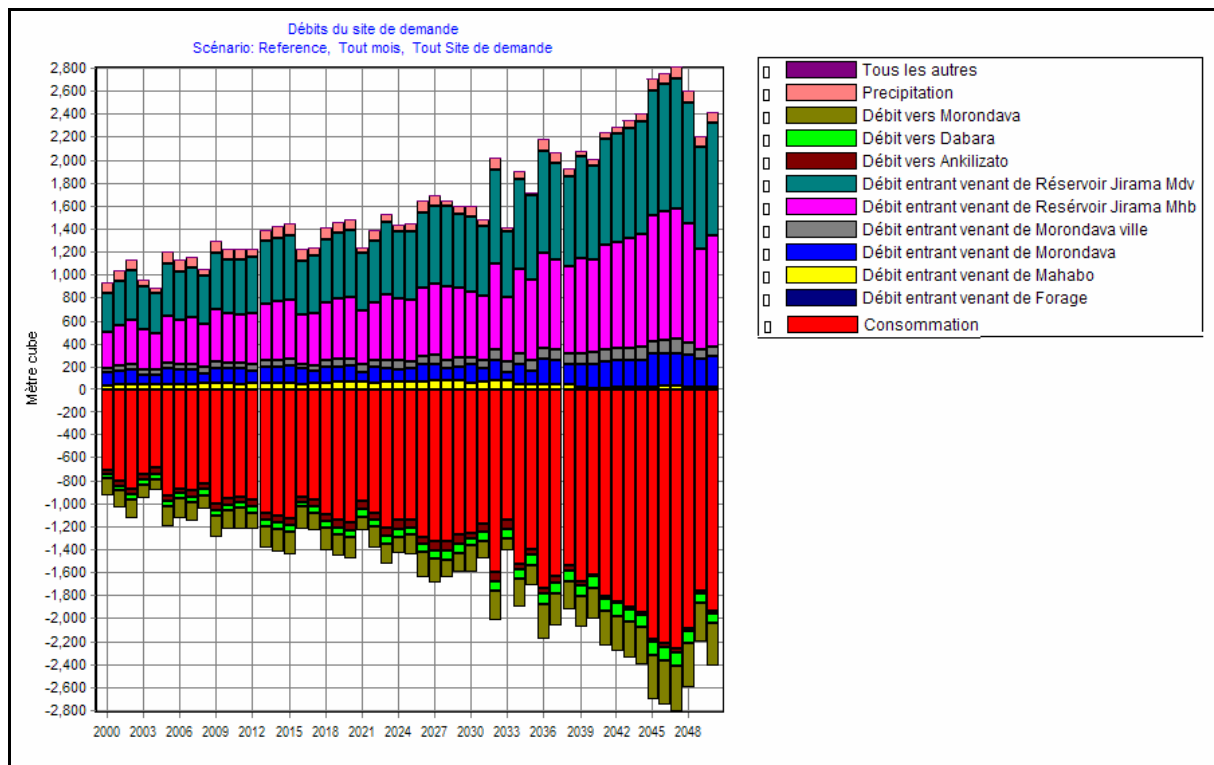
Pour la consommation d'eau au niveau de l'agriculture, on remarque une augmentation de la consommation entre 2036 et 2048. Cette augmentation correspond à une année sèche et normale qui provoque la surexploitation de la rivière de Morondava, son débit consommé augmente.



**Fig. 41:** Débits des sites de demandes en scénario changements climatiques

Par contre, le scénario de référence (Fig. 42) montre qu'il reste un débit non utilisé venant des sources d'approvisionnement. Ce sont les débits vers Mahabo, Morondava ville, et la rivière Morondava qui ne sont pas très remarquables pour ceux du scénario changements climatiques.

On constate aussi que les débits entrants venant des réservoirs de la JIRAMA restent à peu près constants durant toute l'année.



**Fig. 42: Débits du site de demandes scénario de référence**

#### **V.4. BILAN DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU**

Le bilan de gestion des ressources en eau s'annonce comme suit :

$$Q_s : Q_e - Q_u$$

$Q_s$  : débit sortant à l'exutoire du bassin

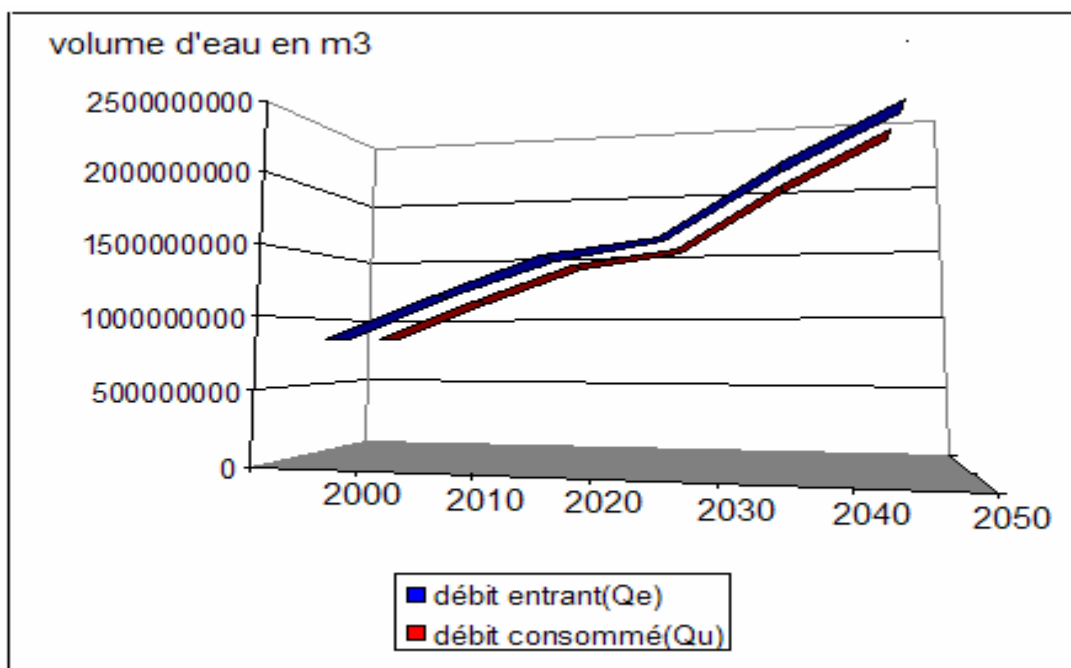
$Q_e$  : débit entrant ou débit venant de toutes les ressources

$Q_u$  : débit utilisé ou volume d'eau consommé par chaque branche d'utilisations

Si l'on ne tient pas compte du changement climatique, le débit entrant dans le bassin est de l'ordre de 9 144 529 795,11 m<sup>3</sup> pour l'horizon 2001 – 2050.

Les débits utilisés (consommés par les utilisateurs) sont de 9 144 522 413,12 m<sup>3</sup>, ce qui implique que le débit sortant sera de 7381,99 m<sup>3</sup>. Ce débit sortant indique le débit non utilisé restant dans le bassin évaporé ou exporté, ce débit évolue au cours du temps, le graphe ci-dessous (Fig.43) montre cette évolution pour le scénario de référence.





**Fig. 43: Comparaison débit entrant et la consommation en scénario de référence**

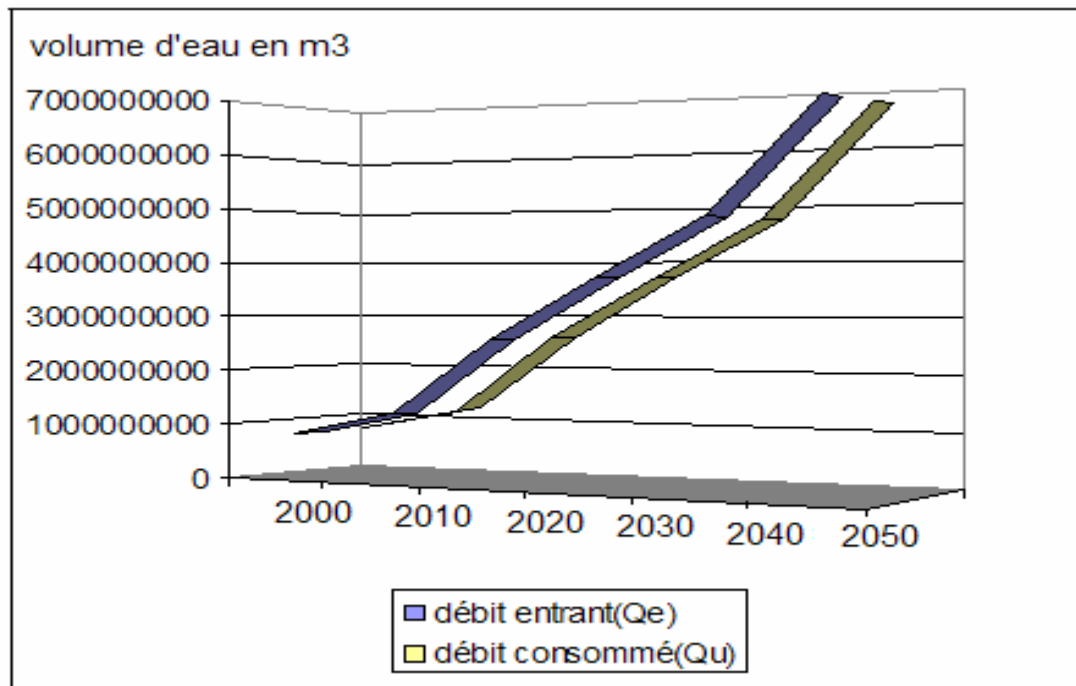
L'écart entre ces deux courbes se trouve le débit sortant de l'exutoire : débit non utilisé plus les quantités évaporées ou exportées.

Pour l'année 2000, ce débit étant le même pour les deux scénarios de l'ordre de  $928,32 \text{ m}^3$ .

- en 2010, ce débit augmentera de  $2940,28 \text{ m}^3$ ,
- en 2020 : il sera pareil à celui de l'année 2000,
- en 2030 à 2050 : de l'ordre de  $1\,000 \text{ m}^3$  et,
- en 2040, ce débit diminuera de  $573,25 \text{ m}^3$ .

Pour un éventuel changement climatique, la quantité de débit entrant va atteindre la valeur de  $19\,844\,038\,531,62 \text{ m}^3$  pour l'horizon 2001-2050. De même le débit utilisé ou volume consommé va augmenter de  $19\,844\,033\,659,33 \text{ m}^3$ . D'où le débit sortant dans le système sera de l'ordre de  $4\,872,11 \text{ m}^3$ . On constate qu'il y a moins de débits non utilisés par rapport à celui du scénario de référence.

L'analyse par tranche d'années montre qu'à partir de 2025, on remarquera une augmentation au niveau du débit entrant et volume consommé (Fig. 44 ci-dessus). Cela est dû au fait que les changements climatiques provoquent en terme de quantité une hausse de 20 à 10% de précipitation.



**Fig. 44: Comparaison débit entrant et la consommation avec changements climatiques**

Le bilan de gestion annuelle des ressources en eau par tranche de 10 ans indique que :

- entre 2000 et 2010, on observera moins de débit perdu définitivement, ce débit est estimé  $487.97\text{m}^3$ . C'est une période normale.
- de 2020 à 2030, le débit est aux alentours de  $1000\text{ m}^3$ , caractérisé par un passage d'année très humide à normale probablement à une forte précipitation et ruissellement
- en 2040, le débit est de l'ordre de  $908.84\text{ m}^3$ , ce serait une période sèche avec possibilité d'une forte évapotranspiration
- en 2050, le débit est de  $523.96\text{ m}^3$ , qui correspondrait à une année normale.

Bref, le bilan de gestion de l'eau du Bassin est positif, on ne s'attendra pas à un déficit d'eau pour l'année à venir.

Il y aura certainement un changement mais sans aucun effet sur les utilisateurs si l'eau est bien gérée. Par contre, au niveau du système aquatique, on remarquera une augmentation de quantité des ressources comme le scénario indique. On passe des années normales à des années humides à très humide avec un peu de passage des années sèches.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude sur la vulnérabilité des ressources en eau aux phénomènes de changements climatiques dans le bassin versant Morondava montre que tous les secteurs vitaux sont affectés.

On peut envisager les conséquences sur une population dont les activités dépendent essentiellement de l'agriculture, en particulier la riziculture.

Le bassin versant de Morondava possède encore une potentialité notable en ressources en eau exploitable aussi bien en eau souterraine qu'en eau de surface.

Ces quantités d'eau exploitables nécessitent une stratégie de gestion intégrée de ressources en eau et d'adaptation aux changements climatiques du secteur, une évaluation des ressources avec les besoins correspondants des utilisateurs afin de pouvoir faire un choix sur le type d'exploitation.

Tous ces travaux devraient être confiés à des personnes compétentes, à des hydrogéologues et en même temps l'utilisation des matériels modernes.

Le logiciel WEAP est très favorable pour établir un plan de gestion des ressources en eau, en tenant compte de la vulnérabilité et ou du changement climatique dans un futur proche. Il permet aussi l'établissement d'un bilan hydrologique et de bilan de gestion (offre et demande).

Le logiciel WEAP offre aussi une opportunité à des éventuelles études sur les analyses sectorielles, d'un coût de projet d'alimentation en eau d'un village (par exemple) ou d'étude d'implantation d'une usine hydro-électrique, sur la qualité des eaux et l'acheminement des pollutions, et sur la proposition d'une station d'épuration.

Par ailleurs, il faut mentionner quelques mesures d'adaptation générale pour la conservation et la protection des ressources en eau comme l'implantation d'un régime réaliste de tarification de l'eau pour éviter le gaspillage dont :

- la prévision des infrastructures nécessaires contre les risques d'inondation
- l'amélioration des systèmes d'assainissement dans les grandes villes
- la mise en place d'une stratégie de gestion intégrée des ressources en eau.

En perspectives, des études plus détaillées dans le même bassin et ou des applications de cet outil très intéressant dans d'autres sites de demandes et d'autres bassins versants sont envisagés.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

### **Ouvrages et mémoires**

1. **ANDRIAMIRADO L.** Ch. (2003) : Application de la méthode de polarisation spontanée (PS) et du panneau électrique à l'étude hydrogéologique de la plaine alluviale de Morondava. Rapport de stage. DEA en Géophysique. Option Géophysique Appliquée. 57p, annexes.
2. **BESAIRIE H.** (1960) : Monographie géologique de Madagascar. Doc. Serv. Géol.
3. **CASTANY G.**, (1982 : 1998). Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod, Paris, 236 p.
4. **CASTANY G. et MARGAT J.** (1977). Dictionnaire français de l'hydrogéologie. BRGM Orléans.150p
5. **CHAPERON P., DANLOUX D., FERRY L.**, (1993), Fleuves et rivières de Madagascar. 866 p
6. **BOUTOUX J.** (1993) Introduction à l'étude des eaux douces eaux naturelles, eaux usées, eau de boisson, qualité et santé. CEBEDOC 2ème Edition, 169p.
7. **DANLOUX J.** (1991) Etudes des crues. Les données d'observation et estimation des débits maximum. Rapport scientifique et technique Sciences de la terre Hydrologie n° 1 Madagascar, Centre ORTOM de Nouméa BP A5 Nouméa Cedex Nouvelle Calédonie.154p
8. **DEGREMONT** (1963) Mémento technique de l'eau.
9. **ELOUARD J-M.** et **ANDRIANTSIFERANA M.**, (1992) Actes des journées de l'eau à Antananarivo – Madagascar, 16-20 Nov. 1992. 306p
10. **EPM INSTAT 2005**
11. **LECOMTE P.** (1995) : Les sites contaminés, traitement des sols et des eaux souterraines. Technique et documentation. Lavoisier, 1995. 196p.
12. **Ministère de l'Agriculture de l'élevage et de la pêche** (2003) : Monographie de la région de Menabe. Secrétariat Général, Unité de Politique pour le Développement Rural (UPDR). 156p et annexes, Juin 2003.
13. **Ministère de l'Economie des Finances et du budget** (2004), Institut National de la Statistique : Les 22 régions de Madagascar en chiffres. Nov. 2004, 256p.
14. **Ministère de l'Environnement et des Eaux et Forêts** (2000) Convention Cadre des Nations Unies sur le changement climatique. Communication Nationale Initiale, 150p.

15. **Ministère de l'Environnement et des Eaux et Forêts.** (Décembre 2006).Préparation de la Seconde Communication Nationale Elaboration des scénarios de changement climatique pour les études de vulnérabilité et adaptation. Zo RABEFITA Déc. 2006, 20p.
16. **Ministère de l'Agricultures** (1995), Schéma d'orientation d'utilisation des ressources dans le plaines de Morondava. Rapport intérimaire SOGREAH INGENIERIE Déc.1995, 160p
17. **Plan Régional du Développement** (2006), Programme SAHA, PNUD : Région de Menabe, Mars 2006.123p
18. **RAKOTONDRAIBE J. H.** (2005), Les huit (8) zones Hydrogéologiques et principales nappes de Madagascar, 1974, mise à jour 2005. 7p
19. **RALAIMARO J.** (2004), Compréhension de la structure et du fonctionnement des aquifères par divers approches scientifiques, en vue de l'alimentation en eau potable, en zone socle altéré des Hautes Terres centrales et en zone sédimentaires du Sud-ouest de Madagascar. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle, ESPA, Univ. d'Antananarivo. Spécialité Génie minéral, Août 2004, 187p, annexes
20. **Rapport de mission sur l'état des lieux sucrerie de Morondava (SUCOMA) et ses environs.** (2000) Mong Ives Jean Michel. Chef de département« Environnement et Qualité de la vie » Octobre 2000.10p

### **Sites web :**

21. Site web du SEI – B : [www.seib.org](http://www.seib.org)
22. Site web WEAP21: [www.weap21.org](http://www.weap21.org)
23. Centre de recherche pour le développement internationale .htm :  
[www.idrc.ca/fr/ev\\_1\\_DO\\_TOPIC.html](http://www.idrc.ca/fr/ev_1_DO_TOPIC.html)
24. Gestion de l'eau : [www.refer.mg/cap/nature/fr/index.htm](http://www.refer.mg/cap/nature/fr/index.htm)
25. web de l'eau douce : Publication \_ FSA\_9 :  
[www.cc.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f\\_FSA9.htm](http://www.cc.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f_FSA9.htm)
26. Environnement Canadien (2004) Vulnérabilité de l'eau au changement climatique,  
<http://www.ec.gc.ca>.
27. Environnement Canadien (2006) Vulnérabilité de l'eau au changement climatique,  
[http://www.ec.gc.ca.Adaptation-nrcan.gc.ca/perspective/water\\_1\\_f.php](http://www.ec.gc.ca.Adaptation-nrcan.gc.ca/perspective/water_1_f.php)
28. Climat France 5 : [http : // éducation.france5.fr/climat/ressenrir\\_climat.htm](http://education.france5.fr/climat/ressenrir_climat.htm)
29. Climatologie : [http:// www.meteolafleche.com/climatologie/climatologie.html](http://www.meteolafleche.com/climatologie/climatologie.html)
30. [www.eau-de-pluie.com](http://www.eau-de-pluie.com)

31. Encyclopédie Encarta 2004.

### **Revues et journaux**

32. CODE DE L'EAU 20 Janvier 1999.

33. Revue photo N° 43 (Juin 2006) Spécial environnement et développement durable p 44 Eau les enjeux majeur du XXI siècle.

34. R.Edmond (2002) Midi Madagascar, Midi Supplément Sud : Seulement 20% de population ont accès à l'eau potable.

### **Autres**

35. Journée de l'eau (2007) Exposition CNEAGR (Centre National d'Etude et Application du Génie Rural) 22 Mars 2007.

# ANNEXES

## ANNEXE n°01 : TRAVAUX DE TERRAIN

Dans le cadre de l'élaboration de ce rapport un travail de terrain a été effectué au mois de Janvier pour collecter de données sur place et pour vérifications.

### **I.1. Objectif de l'étude**

- faire des diagnostics et inventaires des ressources en eau disponible dans la zone d'étude sous chaque forme (eaux de surfaces, eaux souterraines, pluies).
- Evaluer les besoins en eau par chaque secteur :
  - . Utilisations domestiques
  - . Touristiques
  - . Santé et Educations
  - . Élevages
  - . Agricultures
  - . Energies
  - . Exploitations minières
- Apprécier la qualité de l'eau

Délimitation du bassin versant existant

Exécutions d'un bilan hydrologique sommaires

### **I.2. Méthode d'approche**

Un enquête sur terrain qui permet d'évaluer et de quantifier de façon précise les besoins prioritaires, des interview aux seins des :

- . Bénéficiaire (population)
- . Responsables administratifs (représentant du Direction de l'eau, du JIRAMA)
- . Autres utilisateurs (agricultures, tourisms, élevages, exploitations minières)
- . Visites des quelques points d'eau existants
- . Visites des stations météorologiques et hydrologiques existants

### **I.3. Planification**

- . Tracé l'itinéraire
- . Planifier un rendez – vous avec l'autorité
- . Informer les villageois

### **I.4. Résultats attendu**

Pour pouvoir faire l'évaluation des besoins en eau et faire une modélisation à partir d'un logiciel pour la perspective jusqu'à 2050 pour le bassin, ce modèle sera fonctionnel pour tout le bassin versant de Madagascar.



**ANNEXE n°1bis : NORMES DE POTABILITE DES EAUX  
RECOMMANDEES PAR L'OMS**

Catégories	Caractéristiques	Symbole	Unités	Eaux souterraines
<b>Caractères physico-chimiques et organoleptiques</b>	Température	T°	°C	7-25
	Couleur	Coul	U-Pt	0-20
	Turbidité	Tu	g/m <sup>3</sup>	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 <sub>2</sub>		mg /l	> ou = 5
<b>Examen préliminaire</b>	Minéralisation			
	Dureté total	TH	°F	0-60
	Alcalinité	TAC	°F	0-40
<b>Signes de pollution</b>	Matière organique en milieu alcalin	MC	mg/l	0-3
	Azote ammoniacal	NH <sub>4</sub>	mg/l	0-1
	Azote nitreux	NO <sub>2</sub>	mg/l	0-0.5
<b>Éléments toxiques ou indésirables</b>	CO <sub>2</sub> agressive	CO <sub>2</sub>	mg/l	0-100
	Fluorures	N	mg/l	0-10
	Chlorures	Cl	mg/l	0-500
	Sulfates	SO <sub>4</sub>	mg/l	0-500
	Nitrates	NO <sub>3</sub>	mg/l	0-20
	Cyanures	CN	mg/l	0
	Chromates	CrO <sub>4</sub>	mg/l	0
	Chlores libres	Cl	mg/l	0
	Silice	SiO <sub>2</sub>	mg/l	0-80
	Phénols		mg/l	0
<b>Cations</b>	Sodium	Na	mg/l	<i>Liés à SO<sub>4</sub> et Cl</i>
	Potassium	K	mg/l	
	Magnesium	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
<b>Qualité bactériologique</b>	Coliformes totaux			10/100
	Coliformes fécaux			Absence dans 100ml

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

## ANNEXE n°02 : DONNEES CLIMATIQUES DANS LA ZONE D'ETUDE

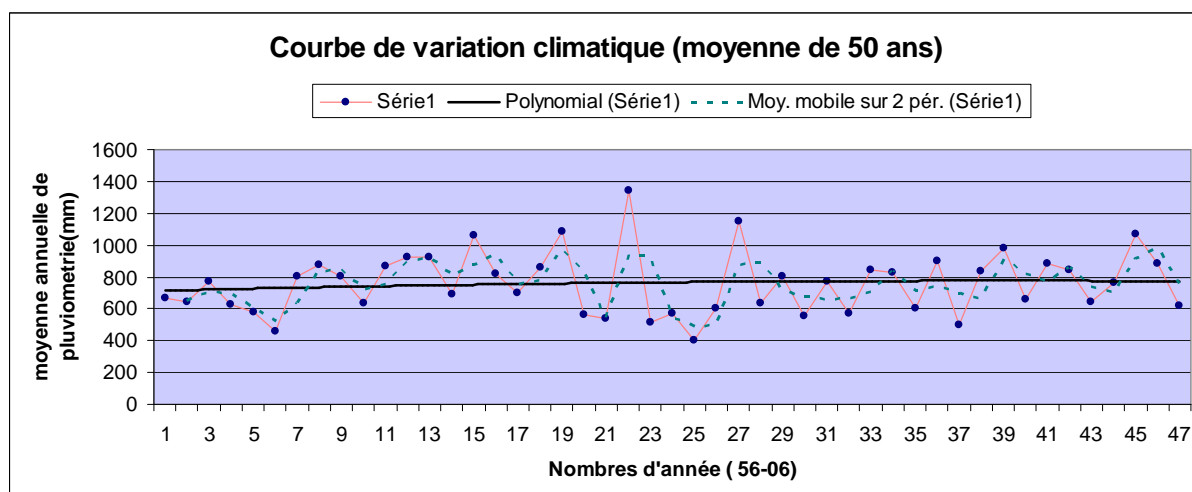
### I. Pluviométrie de 1955 à 2006 moyennes mensuelles

Station Morondava ville (X=20°17'00''S ; Y=44°17'00 ''E ; Z=4 m)													
Années	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sept	Oct	TOTAL
1955/56	0.2	37	238	325.1	46.3	16.4	0	0	0	0	1.5	0	<b>664.5</b>
1956/57	36.8	168.1	54.5	130.8	154.4	43.1	56.3	0	0	0	0	0	<b>644</b>
1957/58	1.9	116.6	289.7	194.3	144.4	3.1	0	0	0	7	15.7	0	<b>772.7</b>
1958/59	8.4	180.2	286.7	110.1	41	0	0	0.1	0	0	0	1.2	<b>627.7</b>
1959/60	5.5	283.6	12106	49.6	69.2	3.6	5.7	0	0	2.5	0	38.5	<b>579.8</b>
1960/61	66.3	127.5	39.1	117.3	99.2	0.3	6	2.4	0.3	2.2	0	0	<b>460.6</b>
1961/62	9.7	321.2	102.3	168.9	67.6	3.8	35.3	0	0	5.3	0	88.1	<b>802.2</b>
1962/63	0	127.9	190.6	401.5	128.8	0	5.5	2.9	17.9	0	0	0	<b>875.1</b>
1963/64	134.6	155.3	215.1	167.7	83.2	4.4	0	4.1	2.1	35.4	4.3	0	<b>806.2</b>
1964/65	56.6	143	266	42	96.1	0	0	12.3	0	0	18.3	4.4	<b>638.7</b>
1965/66	0	224	125.9	401.8	17.7	0	65.1	0	0	0.3	0	30.2	<b>865</b>
1966/67	38.2	274.9	267.9	56.3	277.5	10.4	0	0	0	0.1	0	0.2	<b>925.5</b>
1967/68	28.7	83.5	77.3	587.7	30.3	6.4	85.2	4	0	0	20.7	4.3	<b>928.1</b>
1968/69	0.2	254.4	115.2	280.6	17.9	0	23.9	0	0	0	0	0	<b>692.2</b>
1969/70	3.4	4.39.3	577.1	39.1	3.2	0.1	0	0	0	0	0	0.3	<b>1062.5</b>
1970/71	0	24.3	353.3	325.9	63.9	0	43.5	0.3	0	0	0	7.4	<b>818.6</b>
1971/72	0.3	207.5	171.6	180	98	0	3.1	7.4	5.4	0.1	0.5	22.3	<b>696.2</b>
1972/73	0	97.3	392.9	104.2	259.2	4.8	3.9	0	0.7	0.1	0	0	<b>863.1</b>
1973/74	36.1	561.2	246.6	72	58.7	98.5	0	7.7	0	0	5.2	0	<b>1086</b>
1974/75	11.4	247.7	179.7	50.9	52.4	6.7	7.6	2.9	0.2	0	0	4.3	<b>563.8</b>
1975/76	16.4	131.8	124.5	153.3	50.2	4.3	4.1	0	7.8	14.9	0	29.9	<b>537</b>
1976/77	0.9	31.1	844.6	355.1	67	36.6	0	0	0	0	1.1	2.7	<b>1339.1</b>
1977/78	108.8	15.1	56.4	150.2	116.2	52.9	0	0.2	14.8	0	0	0	<b>514.6</b>
1978/79	3.9	249.3		235	44	27.5	0	0	12.2	0	0	0	<b>*571.9</b>

<b>Station Morondava ville (X=20°17'00''S ; Y=44°17'00 ''E ; Z=4 m)</b>													
<b>Années</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mars</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jui</b>	<b>Jul</b>	<b>Août</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>TOTAL</b>
1979/70	23.7	80	173.4	7.5	26.6	55.5	0	0	0.9	0	34.6	0.5	<b>403.7</b>
1980/81	1.8	222.9	73.1	225.6	59.9	0	0.5	0	0	0	12.9	2.5	<b>599.2</b>
1981/82	52.4	46.8	599.4	193.8	233.2	3.1	0	1.1	0	0.1	0	23.4	<b>1153.3</b>
1982/83	8.3	138.3	254.8	162.7	56.4	0	9.5	0	0	3.6	0	0	<b>633.6</b>
1983/84	0	32.9	268.4	398.2	57.8	38.2	0	0	0	1.7	0	7.4	<b>804.6</b>
1984/85	0.1	243.3	172.1	78.3	15.4	3.5	0	0	6.7	0	1.7	29.9	<b>551</b>
1985/86	3.5	97	49.1	283.2	217.7	1.2	7	24.5	0	0	0	85.6	<b>768.8</b>
1986/87	4	77.4	313.2	64.5	95.5	10.5	0	2.3	0.7	0	0	1.6	<b>569.7</b>
1987/88	10.9	128.1	338.5	170.1	199.7	0	0	0	0	0	0	0	<b>847.3</b>
1988/89	11.8	52.7	358.3	242.5	80.5	21.7	37.2	0	0	0.9	10	8.9	<b>824.5</b>
1989/90	33.4	94.3	236.4	181.6	0.1	53.1	0	0	0	0.8	0	3.9	<b>603.6</b>
1990/91	4.9	75.6	127.4	530.1	68.8	81.4	0	0.4	0	0	6.9	2.9	<b>898.4</b>
1991/92		50.4	278.6	141.7	28.1	0	0	0	0	0	0.1	0	<b>*498.9</b>
1992/93	99.1	35.9	335.9	292.5	59.6	0	13	0	0	1.2	0	0	<b>837.2</b>
1993/94	1.2	81.9	376.1	388.7	90.2	26.3	3.1	0	0		0	9.5	<b>*977</b>
1998/89									2.9	0	0.2	0	<b>659.312</b>
1999/00	199.2	108.3	268.3	286.6	105.4	0	0	0	0	0	0	12.7	<b>880.5</b>
2000/01	10.95	110.7	267.2	395.3	57.25	0.25		1.8			0.15		<b>843.5</b>
2001/02	105.6	23.9	211.2	249.9	47.2	0.5					2.05		<b>640.3</b>
2002/03	38.5	37.15	318.5	282.7	67.4	8.3					4	8.1	<b>764.55</b>
2003/04	3	195.6	342.2	245.6	233.65	19.4			6.6		19	8.1	<b>1073</b>
2004/05	2.4	215.4	357.3	47.55	223.45	18	1.1		4.3		19		<b>888.4</b>
2005/06	3.3	105	293.4	154.6	42.4	3.8	1.1	0	3.8	10			<b>617.25</b>

La connaissance de ces données est nécessaire pour pouvoir élaborer un scénario d'avenir pour un changement climatique en vue.

Le graphe ci-dessous montre la courbe représentative de ces données ainsi que la courbe de tendance.



La courbe de tendance (ligne noire) indique la valeur normale de la pluviométrie dans la région.

En dessous de cette courbe, il y a un climat sec et très sec et en dessus, il indique un climat humide et très humide.

Selon la scénario des changements climatiques pour l'étude de vulnérabilité et adaptation établie par la « Seconde Communication Nationale sur les changements climatiques fin 2006 », nous savons qu'en terme de quantité, en 2025, une hausse de précipitation allant de 10 à 20% aura lieu dans la région de SW, en 2050 presque le même détail.

En terme d'intensité, en 2025, il y aura une diminution de précipitation allant de 10 à 20%,

En qualité d'humidité en 2025-2050, l'humidité augmentera de 2 à 6% sur la partie SW.

A partir de ces données nous avons pu établir le scénario des changements climatiques pour l'année à venir dans la modélisation.

## II. Bilan hydrique

MAHABO

Latitude 20°22

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T ou Moy
T°m	27.8	28.3	27.9	26.9	24.1	23.7	22.8	23.3	25.6	27.4	28.7	26.3	26
i	13.43	13.8	13.5	12.78	10.82	10.55	9.95	10.3	11.85	12.14	14.1	13.9	148.12
E n.c	3.6	3.8	3.6	3.2	2.3	2.2	1.9	2.1	2.8	3.4	3.8	3	
Coef. de corc	34.2	29.7	31.6	29.1	28.8	27.3	28.5	29.3	29.9	32.4	32.6	34.4	
E . pot	123.1	112.6	113.7	93.1	66.2	60	54.1	62.9	81.7	110.1	124	103	1106.8
P	295.6	192.7	153.7	14.4	2.7	0.7	3.2	6.4	8.1	21	39.5	120	853.1
P - ETP	172.6	79.9	40	-78.7	-63.5	-59.3	-50.9	-56.1	-78.6	-89.1	84.3	16.9	
Déficit cumulé				78.7	142.2	201.6	252.4	309	387.1	476.2	561		
Stock	100	100	100	44	23	12	8	4	2	1	1	17.9	
s	0	0	0	-56	-21	-11	-4	-4	-2	-1	0	16.2	-99
ETR	123.1	112.8	113.7	70.4	23.7	11.7	7.2	10.4	7.1	22	39.6	103	644.8
Surplus	172.8	79.9	40										292.4

$$P = E + I + R - s$$

$$855,1 = 644,8 + 16,9 + 292,4 - 99$$

MORONDAVA - VILLE

Latitude 20°17

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T ou Moy
T°m	27.6	27.6	27.3	26	23.5	21.6	20.9	21.8	23.5	25.3	26.7	27.4	24.9
i	13.28	13.28	13.07	12.13	10.41	9.17	8.72	9.29	10.41	11.6	12.63	13.14	137.2
E n.c	3.6	3.6	3.5	3	2.2	1.8	1.7	1.8	2.2	2.8	3.3	3.6	
Coef. de corc	34.2	29.7	31.6	29.1	28.8	27.3	28.5	29.8	29.9	32.4	32.6	34.4	
E pot	123.1	106.9	110.6	87.3	63.3	43.6	48.4	53.6	65.7	90.7	107.5	123.8	1025
P	256	184	137	12	9	2	1	2	5	11	19	117	755
P - ETP	132.9	77.1	26.4	-75.3	-54.3	-41.6	-47.4	-51.6	-60.7	-79.7	-88.5	-6.8	
Déficit cumulé				75	129	171	218	270	331	411	500	507	
Stock	100	100	100	46	27	17	11	6	3	2	1	1	
s	0	0	0	-54	-19	-10	-8	5	-3	-1	-1	0	-99
ETR	123.1	106.9	110.6	66	28	12	7	7	8	12	20	117	617.6
Surplus	132.9	77.1	26.4										236.4

$$P = E + I + R + s$$

$$755 = 617,6 + 0 + 236,4 - 99$$

- **T ou m** : total ou moyenne
- **i** : indice mensuelle
- **E n.c** : évapotranspiration non corrigé
- **coef de correc** : coefficient de correction
- **E pot** : évapotranspiration potentielle
- **ETR** : évapotranspiration réelle
- **ETP** : évapotranspiration potentielle
- **P** : Précipitation

### **III. Maximum de crues**

- *Rivière Morondava à la station Dabara 1955 à 2000*

<b>Années</b>	<b>Q m3/s (Débit)</b>	<b>H m (hauteur d'eau)</b>
1955/56	4120	3.80
1956/57	2220	2.90
1957/58	1440	2.25
1958/59	1260	2.09
1959/60	1440	2.25
1960/61	1130	1.98
1961/62	1450	2.26
1962/63		
1963/64	1830	2.70
1964/65	1830	2.70
1965/66	2400	3.20
1966/67	1600	2.50
1967/68	1330	2.25
1968/69	2430	3.22
1969/70	5940	4.50
1970/71	1240	2.16
1971/72	1560	2.46
1972/73	6380	4.60
1973/74	1380	2.86
1974/75	3830	4.40
1975/76	1220	2.72

- *La Beritsoka au site de Barrage (influent de la Morondava)*

<b>Années</b>	<b>Q m3/s (Débit)</b>	<b>H m (hauteur d'eau)</b>
1969/70	650	4.40
1970/71	485	
1971/72	385	3.58
1972/73	600	4.25

- *La Sakamaly à Migodo ((influent de la Morondava*

<b>Années</b>	<b>Q m3/s (Débit)</b>	<b>H m (hauteur d'eau)</b>
1968/69	1100	4.00
1969/70	2600	4.51
1970/71	770	
1971/72	350	2.70
1982/83	483	2.54

*Sources : Madagascar Etudes des crues Joël DANLOUX 1991*

## ANNEXE n°03 : REPORT DES RESULTATS

### I- Les ressources

#### I.1. Stockage d'eau souterraine scénario de référence (réf)/ scénario changements climatiques (cc) en m<sup>3</sup>/mois

scénarios	cc	réf	année/mois	cc	réf	année/mois	cc	réf	année/mois	cc	réf
mois/ année											
Jan-00	0.320	0.320	Jan-10	0.000	14.718	Jan-20	29.912	32.635	Jan-30	58.204	47.668
Feb-00	0.640	0.640	Feb-10	15.357	15.038	Feb-20	30.391	32.955	Feb-30	58.684	47.988
Mar-00	0.960	0.960	Mar-10	0.000	15.358	Mar-20	30.871	33.275	Mar-30	59.164	48.308
Apr-00	0.960	0.960	Avr- 10	15.357	15.358	Avr -20	30.871	33.275	Avr -30	59.164	48.308
May-00	0.960	0.960	Mai -10	15.357	15.358	Mai -20	30.871	33.275	Mai -30	59.164	48.308
Jun-00	0.000	0.000	Jun-10	15.357	15.358	Jun-20	30.871	33.275	Jun-30	59.164	0.000
Jul-00	0.960	0.960	Jul-10	15.357	15.358	Jul-20	30.871	33.275	Jul-30	0.000	48.308
Aug-00	0.960	0.960	Août -10	15.357	15.358	Août -20	30.870	33.275	Août -30	59.164	48.308
Sep-00	0.960	0.960	Sep-10	15.357	15.358	Sep-20	30.870	33.275	Sep-30	59.164	0.000
Oct-00	1.280	1.280	Oct-10	15.677	15.678	Oct-20	31.350	33.595	Oct-30	59.644	48.628
Nov-00	1.600	1.600	Nov-10	15.997	15.998	Nov-20	31.830	33.915	Nov-30	60.124	48.948
Dec-00	0.000	0.000	Déc- 10	0.000	0.000	Déc -20	32.310	0.000	Déc -30	60.604	49.268
<b>somme:</b>	<b>9.599</b>	<b>9.599</b>	<b>somme:</b>	<b>139.172</b>	<b>168.941</b>	<b>somme:</b>	<b>371.889</b>	<b>366.022</b>	<b>somme:</b>	<b>652.247</b>	<b>484.044</b>

scénarios	cc	réf	année/mois	cc	réf
mois/ année					
Jan-40	84.062	0.000	Jan-50	106.618	84.450
Feb-40	84.542	62.705	Feb-50	0.000	84.930
Mar-40	0.000	0.000	Mar-50	107.098	85.410
Avr- 40	84.542	62.704	Avr- 50	0.000	85.410
Mai 40	84.542	62.704	Mai -50	107.098	85.409
Jun-40	84.542	62.704	Jun-50	107.098	85.409
Jul-40	0.000	62.704	Jul-50	0.000	0.000
Août- 40	0.000	62.704	Août 50	0.000	0.000
Sep-40	84.542	62.704	Sep-50	107.098	85.409
Oct-40	85.022	63.184	Oct-50	107.578	85.888
Nov-40	85.502	63.344	Nov-50	108.058	86.368
Déc- 40	85.982	63.664	Déc- 50	108.538	86.848
<b>somme:</b>	<b>763.274</b>	<b>629.123</b>	<b>somme:</b>	<b>859.184</b>	<b>855.533</b>

## I.2. Les débits entrants venant des eaux souterraines

Débits de la nappe d'eau souterraine en m<sup>3</sup> pour le scénario référence

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Augmentation de stockage	-1.59989	-1.91994	-1.60000	-1.91985	-1.59993	-1.59961	-1.91979	-1.28000	-1.43921	-2.87934	-2.87926	-20.63681259
Baisse du stockage	0.00000	0.00000	0.00016	0.00057	0.00020	0.00021	0.00000	0.00000	0.16057	0.00066	0.00148	0.163849243
Débit vers Etab scol												
Débit vers Hopital												
Débit vers Mahabo	-0.00006	0.00000	-0.00016	-0.00046	-0.00020	-0.00030	-0.00011	0.00000	-0.00058	-0.00067	-0.00111	-0.003643509
Débit vers Morondava ville	-0.00006	-0.00006	0.00000	-0.00027	-0.00007	-0.00030	-0.00010	0.00000	-0.00078	-0.00066	-0.00110	-0.00339024
Débit vers SUCOMA	-0.80000	-0.96000	-0.80000	-0.96000	-0.80000	-0.80000	-0.96000	-0.64000	-0.64000	0.00000	0.00000	-7.359999994
Débit vers Tourisme												
Débordement												
Recharge artificielle de Aquifère alluviale												
Recharge artificielle de Aquifère gréseuse												
Recharge naturelle	2.40000	2.88000	2.40000	2.88000	2.40000	2.40000	2.88000	1.92000	1.92000	2.88000	2.88000	27.84

Débits de la nappe d'eau souterraine en m<sup>3</sup> pour le scénario changements climatiques

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Augmentation de stockage	-1.59989	-1.91972	-0.96000	-1.59955	-2.87965	-2.87878	-2.88000	-1.91865	-2.40000	-2.88000	-2.40000	-24.31623
Baisse du stockage	0.00000	0.00036	0.00031	0.00000	0.00152	0.00362	0.00000	0.00904	0.00000	0.00000	0.00000	0.01485
Débit vers Etab scol												
Débit vers Hopital												
Débit vers Mahabo	-0.00006	-0.00032	-0.00021	-0.00023	-0.00079	-0.00262	0.00000	-0.00523	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00946
Débit vers Morondava ville	-0.00006	-0.00032	-0.00010	-0.00022	-0.00108	-0.00221	0.00000	-0.00516	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00915
Débit vers SUCOMA	-0.80000	-0.96000	-0.48000	-0.80000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-3.04000
Débit vers Tourisme												
Débordement												
Recharge artificielle de Aquifère alluviale												
Recharge artificielle de Aquifère crétacé												
Recharge naturelle	2.40000	2.88000	1.44000	2.40000	2.88000	2.88000	2.88000	1.92000	2.40000	2.88000	2.40000	27.36000



### I.3. Débits venants des autres sources

#### Débits d'autre source d'approvisionnement en m<sup>3</sup> pour le scénario changements climatiques

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Débit de sortie	-6330010	-7600176	-5663693	-6330010	-7600176	-6330010	-6954682	-6309187	-5663693	-5684515	-5101488	-69567638.4
Débit entrant Mensuelle	7144243.2	8577792	6392218	7144243.2	8577792	7144243	7849267.2	7120742	6392218	6415718	5757696	78516172.8
Débit vers Mahabo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Débit vers Morondava ville	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Débit vers SUCOMA	-814233.6	-977616	-728525	-814233.6	-977616	-814234	-894585.6	-811555.2	-728524.8	-731203.2	-656208	-8948534.4

#### Débits d'autre source d'approvisionnement en m<sup>3</sup> pour le scénario Référence

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Débit de sortie	-6330010	-7600176	-6954682	-7600176	-6954682	-6330010	-6350832	-6371654	-6309187	-7600176	-6309187	-74710771.2
Débit entrant Mensuelle	7144243.2	8577792	7849267	8577792	7849267	7144243	7167744	7191245	7120742	8577792	7120742	84320870.4
Débit vers Mahabo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Débit vers Morondava ville	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Débit vers SUCOMA	-814233.6	-977616	-894586	-977616	-894586	-814234	-816912	-819590.4	-811555.2	-977616	-811555	-9610099.2

### I.4. Débit de ruissellement/infiltration (en m<sup>3</sup>)

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Changements climatiques	61.4	63.0	38.1	41.5	63.0	63.0	63.0	40.0	61.0	63.0	25.2	582.1
Condition d'écoulement	61.4	63.0	61.5	63.0	61.5	41.5	62.9	3.8	39.6	63.0	63.0	584.0
Référence	61.4	63.0	61.5	63.0	61.5	41.5	62.9	3.8	39.6	63.0	63.0	584.0

### I.5. Différentielle ETP (ET Pot – ET Réel) (en m<sup>3</sup>)

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Changement climatique	20.915	27.640	17.954	26.873	27.640	26.034	26.801	22.197	21.719	18.048	18.048	253.870
Méthode de l'année hydrologique	20.915	27.640	22.197	27.640	22.197	26.873	25.591	27.640	23.398	27.640	25.962	277.693

## I.6 Débit de la rivière Morondava (en m<sup>3</sup>)

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Somme
Changements climatiques	62.876	65.212	40.951	43.121	64.004	64.568	66.383	46.528	66.947	69.259	33.781	623.630
Condition d'écoulement	62.876	64.928	63.645	65.405	64.17744	101	65.194	5.694	40.125	64.021	63.933	604.100

## II. Les demandes

### II.1. Eau distribuée pour tous sites de demandes (besoins en eau futurs)

#### Eau distribuée en m<sup>3</sup> pour la Scénario Référence

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ankilizato	36419764.1	49033818.1	54670140.6	60954345	67960904.2	63933342.9	56761856	47843576	13277934	26348070.94	24148243.93
Dabara	35945954.2	48395903.3	53958899	60161348	67076753.9	63101589.9	56023402	92968425	103654928	115569818.8	82547285.04
Elevages	81915633.8	83984435.6	81974839.3	83991298	81982144.1	55423684.4	83943010	5062007.6	52836664	84023620.86	84025112.55
Etab scol	35581.1728	42720.816	39092.4727	42720.816	39092.4727	35581.1728	35698.216	35815.259	35464.129	42720.816	35464.12945
Hopital	2663040	3197400	2925840	3197400	2925840	2663040	2671800	2680560	2654280	3197400	2654280
Mahabo	343582680	459692045	474092625	571446985	589348466	597895152	653421366	750607307	828683075	1097748418	989345054.5
Morondava ville	339112776	453711593	467924827	564012637	581681225	590116721	644920557	740842138	817902164	1083467051	976473981.6
SUCOMA	1408928.33	1855489.85	1920308.03	2397762.2	2712676.41	3334593.89	5163736.8	54261555	130218650	193440000	160581698.6
Tourisme	30460.8	36573	33466.8	36573	33466.8	30460.8	30561	30661.2	30360.6	36573	30360.6

#### Eau distribuée en m<sup>3</sup> pour la Scénario changements climatiques

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ankilizato	36419764.1	56129054.7	71636477.6	39452260	25909700.5	40122936	85396750	162218129	148340830	157286858.3	214539598.1
Dabara	35945954.2	55398833.1	70704509.2	76139039	115170195	97610279	153890717	239430564	195762709	188909717.8	241101989.8
Elevages	81915633.8	83988520	50809298.3	55430453	84023387.7	84029466.7	84061100	53488962	81505611	84156696.62	33743785.56
Etab scol	35581.1728	42720.816	31835.7862	35581.173	42720.816	35581.1728	39092.473	35464.129	31835.786	31952.8295	28675.61622
Hopital	2663040	3197400	2382720	2663040	3197400	2663040	2925840	2654280	2382720	2391480	2146200
Mahabo	343582680	526209888	514887183	721426553	1093952564	1146040513	1.611E+09	1.933E+09	2.104E+09	2685770960	3073199962
Morondava ville	339112776	519364060	508188660	712041017	1079720580	1131130880	1.59E+09	1.908E+09	2.077E+09	2650829912	3033218582
SUCOMA	1408928.33	2142418.5	2614500.66	44305354	193440000	161111671	177010849	160581699	144152548	144682520.5	129843287.7
Tourisme	30460.8	36573	27254.4	30460.8	36573	30460.8	33466.8	30360.6	27254.4	27354.6	24549

## Eau distribuée en m<sup>3</sup>

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Changement climatique	841114818.2	1221282439	2595493120	3704726720	4753569932	6727846630
Référence	841114818.2	1137540038	1393760570	1502971988	1949293518	2319841481

### II.2. Eau distribuée par toutes les ressources

#### Eau distribuée par toutes les sources en m<sup>3</sup> scénario de référence

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	Somme
Forage	814233.6	894585.6	894585.6	816912	811555.2	811555.2	5043427.2
Mahabo	36419764.08	54670140.57	67960904.23	56761856.08	13277933.73	24148243.93	253238842.6
Morondava	117230412.1	126600491.9	137419067.4	162484346.2	210079731.5	262102306.1	1015916355
Morondava ville	35945954.23	53958898.97	67076753.91	56023401.9	103654927.8	82547285.04	399207221.8
Réservoir Jirama Mhb	310211073.4	431974245.5	537211184.2	580579768	802191142.5	972382046.2	3634549460
Réservoir Jirama Mdv	340493380	469441675.1	583198073.4	646305702.5	819278227.1	977850044.4	3836567103
Tous les autres	0.000111118	0.000161388	0.000270433	0.000210377	0.001363136	0.001098597	0.003215049
Précipitation	929.116	931.078	931.078	1004.326	573.885	1006.506	5375.989
<b>Somme</b>	841115746.5	1137540969	1393761500	1502972991	1949294092	2319842487	9144527785

#### Eau distribuée par toutes les sources scénario changements climatiques en m<sup>3</sup>

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	Somme
Forage	814233.6	728524.8	977616	894585.6	728524.8	656208	4799692.8
Mahabo	36419764.08	71636477.61	25909700.53	85396749.51	148340830	214539598.1	582243119.8
Morondava	117230412.1	87948576.71	282666007.1	330544786.3	367813883.1	452075174.2	1638278839
Morondava ville	35945954.23	70704509.22	115170195.2	153890716.9	195762709.3	241101989.8	812576074.6
Réservoir Jirama Mhb	310211073.4	480840412.5	1089391389	1542278959	1962694109	2785142420	8170558362
Réservoir Jirama Mdv	340493380	509423937.5	1081378213	1591720923	2078229876	3034331240	8635577569
Précipitation	929.116	498.457	1006.506	1006.506	908.842	523.963	4873.39
Tous les autres	0.000111118	0.000308843	0.001076143	5.82E-07	0	1.98E-06	0.001498662
<b>Somme</b>	841115746.5	1221282937	2595494127	3704727727	4753570841	6727847154	19844038532

### II.3. Débits des sites de demandes

#### Débits du site de demande pour scénario de référence en m<sup>3</sup>

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Consommation	-712412154.3	-955636741	-1164996653	-1255032276	-1619602853	-1938805668
Débit entrant venant de Forage	814233.6	894585.6	894585.6	816912	811555.2	811555.2
Débit entrant venant de Mahabo	36419764.08	54670140.57	67960904.23	56761856.08	13277933.73	24148243.93
Débit entrant venant de Morondava	117230412.1	126600491.9	137419067.4	162484346.2	210079731.5	262102306.1
Débit entrant venant de Morondava ville	35945954.23	53958898.97	67076753.91	56023401.9	103654927.8	82547285.04
Débit entrant venant de Réservoir Jirama Mhb	310211073.4	431974245.5	537211184.2	580579768	802191142.5	972382046.2
Débit entrant venant de Réservoir Jirama Mdv	340493380	469441675.1	583198073.4	646305702.5	819278227.1	977850044.4
Débit vers Ankilizato	-36419764.08	-54670140.57	-67960904.23	-56761856.08	-13277933.73	-24148243.93
Débit vers Dabara	-35945954.23	-53958898.97	-67076753.91	-56023401.9	-103654927.8	-82547285.04
Débit vers Morondava	-149248545.6	-166382057.9	-186834058.1	-235587053.8	-270146303.6	-374990884.4
Précipitation	929.116	931.078	931.078	1004.326	573.885	1006.506
Tous les autres	0.000111118	0.000161388	0.000270433	0.000210377	0.001363136	0.001098597

#### Débits du site de demande pour le scénario changements climatiques en m<sup>3</sup>

	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Consommation	-712412154.3	-1009778718	-2171453965	-3071239470	-3912773865	-5506870377
Débit entrant venant de Forage	814233.6	728524.8	977616	894585.6	728524.8	656208
Débit entrant venant de Mahabo	36419764.08	71636477.61	25909700.53	85396749.51	148340830	214539598.1
Débit entrant venant de Morondava ville	35945954.23	70704509.22	115170195.2	153890716.9	195762709.3	241101989.8
Débit entrant venant de Réservoir Jirama Mhb	310211073.4	480840412.5	1089391389	1542278959	1962694109	2785142420
Débit entrant venant de Réservoir Jirama Mdv	340493380	509423937.5	1081378213	1591720923	2078229876	3034331240
Débit vers Ankilizato	-36419764.08	-71636477.61	-25909700.53	-85396749.51	-148340830	-214539598.1
Débit vers Dabara	-35945954.23	-70704509.22	-115170195.2	-153890716.9	-195762709.3	-241101989.8
Débit vers Morondava	-149248545.6	-119008433.9	-383609860.1	-494850383.9	-587576727.9	-817730964.8
Précipitation	929.116	498.457	1006.506	1006.506	908.842	523.963
Tous les autres	0.000111118	0.000308843	0.001076143	5.82E-07	0	1.98E-06

### **III. Bilan de gestion des ressources**

#### **Bilan scénario de référence en m<sup>3</sup>**

Année	2000	2010	2020	2030	2040	2050
ressources (Q <sub>e</sub> )	841115746.5	1137542978.7	1393761499.8	1502972991.0	1949294091.7	2319842487.5
consommation (Q <sub>u</sub> )	841114818.2	1137540038.4	1393760569.5	1502971987.6	1949293518.4	2319841481.0
Q <sub>e</sub> - Q <sub>u</sub>	928.3160007	2940.278004	930.278003	1003.366001	573.2450025	1006.50489

#### **Bilan scénario changements climatiques en m<sup>3</sup>**

Année	2000	2010	2020	2030	2040	2050
ressources (Q <sub>e</sub> )	841115746.5	1221282936.8	2595494127.0	3704727726.9	4753570840.7	6727847153.8
consommation (Q <sub>u</sub> )	841114818.2	1221282438.8	2595493120.5	3704726720.4	4753569931.9	6727846629.8
Q <sub>e</sub> - Q <sub>u</sub>	928.3158896	497.9766953	1006.504127	1006.505997	908.8419981	523.9629955

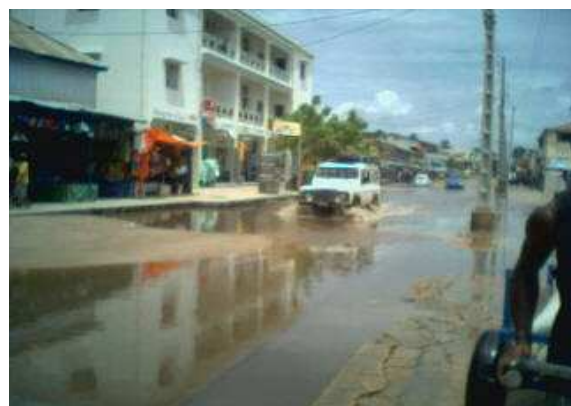
## ANNEXE n°4 : PLANCHES PHOTOS

### 1- Carte d'utilisation du logiciel WEAP dans le monde



Cas extrêmes

### 1- Inondation des infrastructures dans la « ville de Morondava »



a - Routes au centre de la ville (période de pluie, janv. 2007)



b - Ecole inondée (période de pluie, janv. 2007)



c - Rivière au Pont Poamay (Janv. 2007)



d - Inondation par l'eau marée haute équinoxiale

e - Destruction des infrastructures routières « zone de Mahabo »



Au Pont Poamay Janv. 2007

## 2 - Types de points d'eau existant dans la Région de Morondava



a - Château d'eau JICA Bemanonga



b - Borne fontaine à 2 robinets à Analaiwa





c - Forage muni d'une pompe pédale (vergné) à Ambohimpitiavana



d - Borne fontaine publique sans protection à Mahabo

### **3- Infrastructures touristiques région de Morondava**



a - Chauffe-eau d'un Hôtel (L'Arche de Noé)



b - Hôtel (Bangalow ville) menacé par l'érosion marine

### **4 - Station Météorologique Morondava Aéroport**



a - Station Météorologique complète



b - Température, humidité de l'air





c- Pluviographe



d- Pluviomètre

### 5 - Rivière de Morondava au barrage hydro agricole de Dabara



a - Barrage Dabara



b - Désableur Dabara

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	1
INTRODUCTION.....	7
<b><u>PARTIE I</u></b> : PROBLEMES DES RESSOURCES EN EAU : VULNERABILITES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	8
I.1. RESSOURCES EN EAU .....	9
<i>I.1.1. Précipitation ou l'eau de pluie</i> .....	9
<i>I.1.2. Eaux de surfaces</i> .....	9
I.1.2.1. Eau des fleuves et rivières .....	9
I.1.2.2. Eau des lacs et marais .....	10
<i>I.1.3. Eaux souterraines</i> .....	10
I.2.VULNERABILITES DES RESSOURCES EN EAU .....	11
<i>I.2.1. Définition</i> .....	11
<i>I.2.2. Facteurs de vulnérabilité des ressources en eau</i> .....	11
<i>I.2.3. Variabilité et changements climatiques</i> .....	11
I.2.3.1. Climat .....	11
I.2.3.2. Changements climatiques .....	12
I.2.3.3. Origine des changements climatiques : .....	12
<i>I.2.4. Indices de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques</i> .....	12
I.2.4.1. Dégradation de la quantité des ressources .....	12
I.2.4.2. Dégradation de la qualité des ressources .....	13
I.3. SOLUTIONS PROPOSEES .....	15
<b><u>PARTIE II</u></b> : METHODES D'APPROCHE : LE LOGICIEL WEAP 21.....	16
II.1. DESCRIPTION DU LOGICIEL.....	17
<i>II.1.1. Principaux objectifs du logiciel</i> .....	17
<i>II.1.2. Acquisition du logiciel</i> .....	18
<i>II.1.3. Structure du Logiciel</i> .....	18
II.1.3.1. Cartographie .....	18
II.1.3.2. Base de données .....	19
II.1.3.3. Présentation des résultats.....	20
II.1.3.4. Représentation graphique .....	20
II.1.3.5 Bloc Notes .....	20
II.2. FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL.....	21
<i>II.2.1. Créer une zone d'étude</i> .....	21
<i>II.2.2. Créer les hypothèses clés et références</i> .....	21
II.2.2.1. Hypothèses clés .....	21
II.2.2.2. Références .....	21
<i>II.2.3. Proposer des Scénarii</i> .....	21
<i>II.2.4. Saisir les données</i> .....	21
<i>II.2.5. Présenter les résultats</i> .....	22
II.3. DONNEES NECESSAIRES .....	22
<i>II.3.1. Etude de l'offre et de la demande en eau</i> .....	22
<i>II.3.2. Etude de la qualité de l'eau</i> .....	23
<i>II.3.3. Etude hydrologique</i> .....	23
<i>II.3.4. Etudes hydro-électriques</i> .....	23

<b><u>PARTIE III</u></b> : APPLICATION DU MODELE DANS LE BASSIN DE MORONDAVA.....	24
III.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	25
<i>III.1.1. Localisation</i> .....	25
<i>III.1.2. Communes touchées par l'étude</i> .....	25
III.2. CONTEXTES PHYSIQUES .....	26
<i>III.2.1. Contexte climatique</i> .....	26
III.2.1.1. Température .....	27
III.2.1.2. Pluviométrie .....	27
III.2.1.3. Vents .....	29
III.2.1.4. Cyclones.....	30
<i>III.2.2. Contexte géologique</i> .....	31
<i>III.2.3. Contexte pédologique</i> .....	32
<i>III.2.4. Contexte Hydrographie - Hydrogéologique</i> .....	32
III.2.4.1. Hydrographie : .....	32
III.2.4.2. Hydrogéologie.....	33
III.3. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE .....	36
<i>III.3.1. Population</i> .....	36
<i>III.3.2. Activités</i> .....	36
<i>III.3.3. Infrastructures sociales</i> .....	37
III.3.3.1. Services de la santé .....	37
III.3.3.2. Services de l'éducation .....	37
III.4. CONTEXTE BIOLOGIQUE.....	37
<i>III.4.1. Flores</i> .....	37
<i>III.4.2. Faunes</i> .....	37
III.5. UTILISATION DES RESSOURCES ET ESTIMATION DES BESOINS EN EAU.....	38
<i>III.5.1. Secteur alimentation en eau potable</i> .....	38
<i>III.5.2. Secteur élevage</i> .....	39
<i>III.5.3. Secteur agriculture</i> .....	40
<i>III.5.4. Secteur Infrastructures sanitaires et éducatifs</i> .....	41
III.5.4.1. Infrastructures sanitaires .....	41
III.5.4.2. Infrastructures éducatives .....	41
<i>III.5.5. Secteur Tourisme</i> .....	42
<b><u>PARTIE IV</u></b> : ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES.....	43
IV.1. LES DONNEES TRAITEES.....	44
<i>IV.1.1. Sites de demandes</i> .....	44
<i>IV.1.2. Barrage de retenue</i> .....	45
<i>IV.1.3. Rivières</i> .....	46
<i>IV.1.4. Eaux souterraines</i> .....	47
<i>IV.1.5. Hydrologie</i> .....	49
<i>IV.1.6. Qualité de l'eau</i> .....	50
IV.2. MODELISATION PAR WEAP .....	51
<i>IV.2.1. Cartographie</i> .....	51
IV.2.1.1. Créer le modèle :.....	51
IV.2.1.2. Réglage des paramètres généraux.....	53
IV.2.1.3. Numérisations des éléments nécessaires dans le modèle.....	53
<i>IV.2.2. Création des hypothèses clés</i> .....	53
<i>IV.2.3. Création des scénarii</i> .....	54

IV.2.3.1. Changement d'horizon de temps du secteur .....	54
IV.2.3.2. Création de scénario de référence .....	54
IV.2.3.3. Création de scénario « Méthode de l'année hydrologique » .....	56
<i>IV.2.4. Raffinage des demandes</i> .....	58
IV.2.4.1. Ajout des autres sites de demandes.....	58
IV.2.4.2. Priorités d'approvisionnement .....	58
IV.2.4.3. Ajout d'une condition d'écoulement .....	59
IV.2.4.4. Modélisation des ressources en eaux souterraines.....	59
<i>IV.2.5. Saisie des données</i> .....	59
IV.2.5.1. Saisie des éléments d'affichage cartographique .....	59
IV.2.4.2. Modélisation de la qualité de l'eau .....	66
<b><u>PARTIE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</u></b> .....	68
V.1. PRESENTATION CARTOGRAPHIQUE FINALE DU MODELE.....	69
V.2. RESSOURCES EN EAU DU BASSIN .....	70
V.2.1. <i>Disponibilités en quantité des ressources en eau existantes</i> .....	70
V.2.1.1. Eaux souterraines et vulnérabilité .....	70
V.2.1.2. Taux d'infiltration et vulnérabilité .....	74
V.2.1.3. Evapotranspiration et vulnérabilité .....	75
V.2.1.4. Eau de surface et vulnérabilité .....	76
V.2.2. <i>Disponibilité en qualité des ressources en eau existantes</i> .....	77
V.3. DEMANDES OU BESOINS EN EAU.....	77
V.3.1. <i>L'eau qui sera distribuée pour tous les sites de demandes pour l'horizon 2001-2050..</i>	77
V.3.2. <i>Débit du site de demandes pour l'horizon 2001-2050</i> .....	79
V.4. BILAN DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU.....	81
CONCLUSIONS ET RECOMMADATIONS.....	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	85
ANNEXE n°01 : TRAVAUX DE TERRAIN .....	ii
ANNEXE n°01bis : NORMES DE POTABILITE RECOMMANDES PAR L'OMS .....	iii
ANNEXE n°02 : DONNEES CLIMATIQUES DANS LA ZONE D'ETUDE .....	iv
ANNEXE n°03 : REPORT DES RESULTATS .....	ix
ANNEXE n°04 : PLANCHES PHOTOS .....	ciii
LISTES DES FIGURES	
LISTES DES TABLEAUX	
SIGLES ET ABREVIATIONS	

## LISTES DES FIGURES

- Fig. 1: Les cinq affichages du Modèle Weap..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 2: Fenêtre cartographie WEAP ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 3a: Fenêtre base de données ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 3b: Organigramme du fonctionnement du logiciel.....22
- Fig. 4: Carte topographique du bassin de Morondava et ses environs**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 5: Courbe de l'évolution des températures avec le courbe de tendance**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 6: Carte isohyète du Bassin de Morondava et ses alentours .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 7: Courbe de l'évolution des précipitations mensuelles avec le courbe de tendance**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 8: Carte géologique du Bassin de Morondava et ses environs **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 9: Ressources en eau dans le Bassin de Morondava et ses environs**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 10: Création du modèle (Fig.10a, 10b, 10c) ..... 52
- Fig. 11: Fenêtre montrant les hypothèses clés ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 12: Création du scénario ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 13: Scénario de référence..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 14: Fenêtre de données besoins en eau future pour l'irrigation **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 15: Fenêtre Méthode de l'année hydrologique(Fig.15a,15b)..... 56-57
- Fig. 16: Fenêtre montrant les scénarios en méthode de l'année hydrologique**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 17: Fenêtre mode d'entre des donnes ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 18: Fenêtre Sites de demandes avec les données et graphes ... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 19: Fenêtre « Sites de demandes » et les besoins en eau secteurs élevages**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 20: Boite à dialogue Information générale pour le Bassin versant.....61
- Fig. 21: Boite à dialogue pour choisir la méthode de calcul..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 22: Fenêtre bassin versant (Fig.22a, 22b) ..... 62-63
- Fig. 23: Fenêtre débit sur le barrage ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 24: Fenêtre informations sur les réservoirs de la JIRAMA .... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 25: Fenêtre débit entrant pour les autres sources..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 26: Fenêtre montrant les recharges naturelles des aquifères ... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 27a: Eléments de la qualité de l'eau.....66
- Fig. 27b: Fenêtre qualité de l'eau (pH) pour l'eau souterraine..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 28: Fenêtre qualité de l'eau (turbidité) pour les autres sources **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 29: Le bassin versant de Morondava d'après le Modèle WEAP 21**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 30: Evolution des stockages d'eaux souterraines jusqu'à 2050 ..... 71
- Fig. 31: Débit entrant des eaux souterraines sc. référence..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 32: Débit entrant des eaux souterraines sc. changement climatique**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 33: Débit fournit par les autres ressources sc. référence ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 34: Débit fournit par les autres sources sc. changements climatiques **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 35: Débit de ruissellement/infiltration ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 36: Evolution de l'évapotranspiration ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 37: Evolution des débits d'eau de surface ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 38: Eau distribuée à chaque site de demande scénario de référence**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 39: Eau distribuée à chaque site de demande scénario changements climatiques**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 40: Eau distribuée en scénario de référence et changements climatiques**Erreur ! Signet non défini.**

Fig. 41: Débits des sites de demandes en scénario changements climatiques **Erreur ! Signet non défini.**

Fig. 42: Débits du site de demandes scénario de référence ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Fig. 43: Comparaison du débit entrant et la consommation sans changements climatiques **Erreur ! Signet non défini.**

Fig. 44: Comparaison du débit entrant et la consommation avec changements climatiques **Erreur ! Signet non défini.**

## LISTES DES TABLEAUX

Tab. 1: Température moyenne mensuelle (C°) (2000-2006) .....	27
Tab. 2: Evolution des précipitations moyennes mensuelles (2000-2006) .....	29
Tab. 3: Résumés des données climatiques normales de 30 ans (1971 - 2000) .....	29
Tab. 4: Cyclones ayant causé des grands dégâts dans la zone de Morondava.....	30
Tab. 5: Récapitulation données Géophysiques .....	33
Tab. 6: Les divers types de nappe dans le bassin versant de Morondava .....	35
Tab. 7: Répartition de populations (INSTAT, 2004) .....	36
Tab. 8: Les différentes ethnies et leurs activités .....	36
Tab. 9: Couverture sanitaires .....	37
Tab. 10: Couverture éducative .....	37
Tab. 11: Points d'eau potable et population desservie dans le bassin versant de Morondava .	38
Tab. 12: Nombre de population abonnée au JIRAMA .....	38
Tab. 13: Répartition des besoins en eau.....	39
Tab. 14: Besoin en eau théorique par type d'élevage.....	39
Tab. 15: Répartition des bétails et besoin en eau.....	39
Tab. 16: Besoin en eau théorique par types de culture .....	40
Tab. 17: Répartition des surfaces irriguées (ha) et besoin en eau.....	40
Tab. 18: Répartition des nombres des élèves dans la zone d'étude.....	41
Tab. 19: Besoins en eaux journalières des élèves .....	41
Tab. 20: Besoins en eau du secteur Tourisme.....	42
Tab. 21: Les informations nécessaires pour les sites de demandes .....	44
Tab. 22: Variation journalière du débit à Dabara.....	46
Tab. 23: Débits et évaporation potentielle (ETP) dans le Bassin.....	47
Tab. 24: Les informations nécessaires pour les ressources en eaux souterraines .....	47
Tab. 25: Les informations nécessaires pour les réservoirs de la JIRAMA (Tab.25a,25b) .....	48
Tab. 26: Les informations nécessaires pour les autres points d'eau.....	50
Tab. 27: Informations nécessaires pour l'occupation du sol .....	50
Tab. 28: Les informations nécessaires pour la branche climatique .....	50
Tab. 29: Listes des éléments à modéliser indiquant le source de polluants.....	51
Tab. 30: Taux d'utilisation de l'eau pour l'irrigation pour l'année future .....	55
Tab. 31: Définitions des types de climats .....	56
Tab. 32: Répartition des types d'années .....	57
Tab. 33: Liaisons de transmission .....	59
Tab. 34: Débits des autres sources d'approvisionnements en eau.....	74

## SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>AEP :</b>	Adduction d'Eau Potable
<b>CHD :</b>	Centre Hospitalier de District
<b>CSB1 :</b>	Centre de Santé de Base niveau 1
<b>CSB2 :</b>	Centre de Santé de Base niveau 2
<b>CNRE :</b>	Centre National de Recherche Environnemental
<b>DRSPF :</b>	Direction Régionale de la Santé et du Planning Familial
<b>DEA :</b>	Direction de l'Eau et de l'Assainissement
<b>ETP :</b>	Evapotranspiration potentiel
<b>ETR :</b>	Evapotranspiration réelle
<b>E :</b>	Evaporation
<b>GPI :</b>	Grand Périmètre irriguée
<b>I :</b>	Infiltration
<b>JIRAMA :</b>	Jiro sy Rano Malagasy
<b>MEM :</b>	Ministère de l'Energie et des Mines
<b>MAEP :</b>	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
<b>MinEnv EF :</b>	Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts
<b>MO :</b>	Matière Organiques
<b>ONG :</b>	Organisme non gouvernementale
<b>PRD :</b>	Programme Régional de Développement
<b>P :</b>	Précipitation
<b>Q :</b>	Débits
<b>R :</b>	Ruissellement
<b>SEI :</b>	Stockholm Environment Institutes
<b>SSD :</b>	Service de Santé de District
<b>SUCOMA :</b>	Sucrerie Complat de Madagascar
<b>UPRD :</b>	Unité Politique pour le Développement
<b>WEAP :</b>	Water Evaluation And Planning System



**Titre: Etudes de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21: Cas du bassin versant de Morondava (Sud ouest de Madagascar)**

**Auteur :** RAKOTONDRABE *Felaniaina*

e-mail : fln\_hydrogeologue@laposte .net / rak.fleur@voila.fr

☎ : 261 33 14 521 26/ 261 32 11 521 26

Nombres de pages: 84

Nombres de tableaux : 34

Nombres de figures: 44

Nombres de photos: 21

**Résumé :**

Les ressources en eau sont vulnérables aux changements climatiques. Une évaluation des ressources disponibles (eau de surface, eau souterraine, eau de pluie) est nécessaire pour subvenir aux besoins dans différents domaines: en agriculture, en industrie, en alimentation en eau potable de la population. A partir de cette étude, un scénario d'allocation d'année future en tenant compte des changements climatiques doit être élaboré avec un modèle informatique et les outils de simulation, comme le modèle WEAP.

Le modèle WEAP est un outil de prévision qui simule toutes les ressources en eau, l'offre et la demande, la qualité de l'eau et l'application avec un changement climatique. Pour un bon usage du logiciel une application dans un bassin versant concret est nécessaire. Le bassin versant de Morondava a été choisi pour une première application avec horizon de 2001 - 2050.

Les résultats sont satisfaisants d'où les perspectives d'utiliser le modèle pour d'autres bassins versants.

**Mots clés :** sites de demandes, ressources, bassin versant, changements climatiques, vulnérabilités, scénarii, Weap.

**Summary:**

The water resources are vulnerable to the climatic changes. An evaluation of the resources available (ground water, subsoil water, rainwater) is necessary to provide for the needs in different domaines: en agriculture, in industry, drinking water supply of the population. From this study, a scenario of allowance of future year by taking account of the climatic changes must be elaborate with a data-processing model and the tools for simulation, models WEAP.

Model WEAP is a tool of forecast which simulates all the water resources, supply and demand, the quality of water and application with a climatic change. For a good use of the software an application in a concrete area catchment is necessary. The catchment area of Morondava was selected for a first application with horizon of 2001 - 2050.

The results are satisfactory from where prospects to use the model for other catachement .

**Key word:** Demand sites, supply and resources, climatic changes, vulnerabilities, scénarii, Weap.

**Rapporteur :** RALAIMARO *Joseph*