

LISTE DES ACRONYMES

- ANDEA : Autorité Nationale De l'Eau et de l'Assainissement
- DEPA : Direction de l'Eau Potable et de l'Assainissement
- FAO: Food and Agricultural Organization
- GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
- MAP : Madagascar Action Plan
- PNAEPA : Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement
- PSNA : Politique et Stratégie Nationale de l'Assainissement
- SOREA : Organisme régulateur du service public de l'eau et de l'assainissement
- VSD: Vulnerability Scoping Diagram
- WEAP: Water Evaluation And Planning system

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : ETAT DES CONNAISSANCES	2
I.1. LES RESSOURCES EN EAU FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES A MADAGASCAR	2
I.1.1. <i>Les ressources en eau à Madagascar : une eau continentale à réseaux hydrographiques denses.....</i>	2
I.1.2. <i>Les lacs malgaches : 1300 lacs continentaux et littoraux</i>	2
I.1.3. <i>Le changement climatique à Madagascar : entre inondation fréquente et sécheresse prolongée.....</i>	3
I.1.4. <i>Cadre institutionnel sur le secteur de l'eau à Madagascar : partant du MAP</i>	4
I.2. LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	5
I.2.1. <i>Définition de la vulnérabilité : des notions divergentes mais complémentaires</i>	5
I.2.1.1. La vulnérabilité associée aux termes « capacité d'adaptation, sensibilité et exposition » au changement climatique	5
I.2.1.2. La vulnérabilité dans un sens socio-économique.....	5
I.2.2. <i>Principe de la vulnérabilité : comparaison entre disponibilité en eau et usage de l'eau.....</i>	6
I.3. LES REALISATIONS CONCERNANT LES METHODES D'ETUDE DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU.....	6
I.3.1. <i>Etude de la vulnérabilité : une idée de standardisation des indicateurs.....</i>	6
I.3.2. <i>Les différentes méthodologies pour l'étude de la vulnérabilité: méthodologies différentes mais complémentaire.....</i>	7
I.3.2.1. L'approche « Eight steps » de SHROETER et al.	7
I.3.2.2. Le Vulnerability Scoping Diagram (VSD) de POLSKY et al.	9
I.3.2.3. Le Water Evaluation And Planning system (WEAP) : Outil de planification de gestion intégrée des ressources en eau	10
I.3.2.4. L'approche par indicateurs de ROUDIER	11
I.3.2.5. Le « Vulnerability Spider Diagram » ou Diagramme en toile de la vulnérabilité	12
PARTIE II : MATERIELS ET METHODES	14
II.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES	14
II.1.1. <i>La dégradation environnementale et le tarissement des lacs : une nécessité d'anticiper le futur des ressources en eau</i>	14
II.1.2. <i>Existe-t-il alors un outil plus pratique pour la mesure de la vulnérabilité des lacs malgaches ?</i>	14
II.1.3. <i>Serait-il possible de quantifier la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs malgaches ?</i>	15
II.2. HYPOTHESES ET INDICATEURS DE VERIFICATION	16
II.2.1. <i>L'hypothèse unique de travail : une hypothèse méthodologique.....</i>	16
II.2.2. <i>Les indicateurs de vérification de l'hypothèse: basés sur des aspects pratiques..</i>	16
II.3. LA METHODE UTILISEE POUR VERIFIER L'HYPOTHESE	17
II.3.1. <i>Les méthodes d'analyse de la vulnérabilité prises en compte : le Water Evaluation And Planning system (WEAP) et le Vulnerability Scoping Diagram (VSD).....</i>	17
II.3.2. <i>La méthodologie : fondée sur une analyse comparative</i>	18
II.3.2.1. Démarche générale : collecte de données suivie de traitement des données..	19
II.3.2.2. Démarche spécifique pour le Water Evaluation And Planning system et le Vulnerability Scoping Diagram	20
II.3.3. <i>Les matériels utilisés : le logiciel WEAP et le Diagramme pour le VSD</i>	21

<i>II.3.4. Les étapes de la vérification de l'hypothèse pour chaque indicateur</i>	21
<i>II.3.5. Etude de cas : le lac Lohazozoro de Vontovorona</i>	22
II.3.5.1. Délimitation administrative	22
II.3.5.2. Le lac Lohazozoro : né de la rivière Andromba	23
II.3.5.3. Lohazozoro alimenté par des petits bassins versants mais sujet à un tarissement progressif.....	23
PARTIE III: RESULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE LE WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM ET LE VULNERABILITY SCOPING DIAGRAM	25
III.1. DES COLLECTES DES DONNEES DEPENDANTES DES OBJECTIFS DE CONCEPTION DE CHAQUE METHODOLOGIE.....	25
III.2. CHAMPS D'INTERVENTION DANS L'ANALYSE DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU : TRES VARIES POUR LE VULNERABILITY SCOPING DIAGRAM	26
III.3. L'APTITUDE A LA PROJECTION OU A LA MODELISATION : LE WEAP DEVANCE LARGEMENT LE VSD	28
<i>III.3.1. Le Water Evaluation And Planning system.....</i>	28
III.3.1.1. La spécification de la zone d'étude : point focal du plan d'aménagement eau pour le WEAP	28
III.3.1.2. La spécification de la source : basée sur le débit entrant et le débit de retour	29
III.3.1.3. La création du site de demande : focalisée sur la zone bénéficiaire.....	29
III.3.1.4. La connexion entre source et site de demande : anticipation de la satisfaction de la demande	29
III.3.1.5. La « Méthode de l'année hydrologique » : une projection suivant le régime pluviométrique interannuel	30
III.3.1.6. Le scénario proprement dit : sur la base des « Hypothèses clés ».....	30
<i>III.3.2. Le Vulnerability Scoping Diagram: se limite à indiquer la dimension de la vulnérabilité (capacité d'adaptation, degré d'exposition et sensibilité).....</i>	30
III.4. FACILITE D'USAGE : FONDEE SUR LA GAMME DES UTILISATEURS POTENTIELS	32
III.5. RENTABILITE ECONOMIQUE : RAPPORT THEORIQUE INVESTISSEMENT SUR RESULTATS DE MODELISATION	33
III.6. ENTRE LE WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM ET LE VULNERABILITY SCOPING DIAGRAM : UNE COMPLEMENTARITE	35
III.7. LA MODELISATION POUR LE CAS DU LAC LOHAZOZORO : REALISEE EXCLUSIVEMENT AVEC LE WEAP	36
<i>III.7.1. La caractérisation de la source « Lac Lohazozoro »: la capacité du lac</i>	36
<i>III.7.2. La caractérisation du site de demande : le Fokontany d'Antanety II.....</i>	36
III.7.2.1. Le niveau d'activité annuel	37
III.7.2.2. L'utilisation annuelle de l'eau par unité d'activité.....	37
III.7.2.3. La variation mensuelle de la demande	37
III.7.2.4. La consommation réelle mensuelle	38
<i>III.7.3. Les connexions entre le site de demande et la source pour l'illustration des flux d'eau sortant et entrant du lac</i>	38
<i>III.7.4. Les scénarii de référence sur la base des données de l'état actuel.....</i>	39
<i>III.7.5. Les outils de base du scénario proprement dit : les hypothèses clés</i>	39
III.7.5.1. Le taux d'accroissement de la population	39
III.7.5.2. La pluviométrie annuelle.....	42
PARTIE IV : DISCUSSIONS METHODOLOGIQUES.....	45
IV.1. LES LIMITES RENCONTREES LORS DE L'INVESTIGATION	45

<i>IV.1.1. Une défaillance au niveau des informations disponibles concernant les méthodologies VSD et WEAP.....</i>	45
<i>IV.1.2. Une défaillance au niveau des expérimentations sur terrain.....</i>	45
<i>IV.1.3. Des limites de modélisation pour l'utilisation de WEAP</i>	45
<i>IV.1.4. La quantification de la vulnérabilité des ressources en eau</i>	46
IV.2. DISCUSSIONS METHODOLOGIQUES.....	46
<i>IV.2.1. Méthodologies d'étude de la vulnérabilité</i>	46
IV.2.1.1. Une combinaison WEAP et VSD	46
IV.2.1.2. Le Vulnerability spider diagram : une alternative pour un VSD simplifié ...	47
IV.2.1.3. Calcul manuel de la vulnérabilité des ressources en eau	47
<i>IV.2.2. Traitement des données pour WEAP et VSD.....</i>	47
<i>IV.2.3. A propos de l'étude environnementale du lac « Lohazozoro » de Vontovorona..</i>	48
CONCLUSION.....	49
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXE	52

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Réseaux hydrographiques et bassins fluviaux de Madagascar.....	2
Figure 02 : Répartitions des Rivières et quelques Lacs importants	3
Figure 03 : Approche en 8 points de l'évaluation de la vulnérabilité de SCHROTER.....	7
Figure 04: Forme Générale du Vulnerability Scoping Diagram.....	9
Figure 05: Vulnerability spider diagram of the major components of the Livelihood Vulnerability Index (LVI) for Moma and Mabote Districts, Mozambique.....	12
Figure 06 : Complémentarité entre WEAP, VSD et Eight steps	17
Figure 07 : Photo satellite Lac Lohazozoro.....	21
Figure 08: Lac Lohazozoro près de la zone de captage de la JIRAMA.....	22
Figure 09: Bassin versant Andrefan'Ambohimasina.....	22
Figure 10: Vue du lac depuis le Bassin versant de Mamohiadana le plus proche.....	23
Figure 11 : Bassin versant Andrefan'Antaramanana.....	23
Figure 12: Riziculture sur le lac Lohazozoro.....	23
Figure 13: Infrastructure touristique sur le lac.....	23
Figure 14: Diagramme d'envergure de la vulnérabilité.....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°01 : Comparaison des collectes des données pour le WEAP et le VSD	26
Tableau n°02 : Comparaison des champs d'intervention dans l'analyse de l'offre et de la demande	27
Tableau n°03 : Comparaison entre WEAP et VSD sur la facilité d'usage de la méthodologie	33
Tableau n°04 : Comparaison de la rentabilité économique entre WEAP et VSD	34
Tableau n°05: Débit entrant Lac Lohazozoro pour l'état actuel (année 2011 ; unité en m ³)...	56
Tableau n°06 : Pourcentage de la consommation mensuelle réelle en eau par rapport à la disponibilité totale pour l'année 2011 (en %)	56
Tableau n°07 : Débit de retour mensuel pour l'année 2011 (en %).....	56
Tableau n° 08: Les limites pour le traitement avec WEAP.....	56
Tableau n°09 : Traitement Excel des données pour la modélisation de la demande en rapport avec le taux d'accroissement de la population	58
Tableau n°10 : Scénario idéal pour un maintien d'approvisionnement en eau de 2011 à 2041	59

Tableau n°11 : Evolution de la disponibilité en eau par rapport à l'évolution du climat.....	60
Tableau n°12 : Evolution de la demande en eau en rapport avec l'évolution de la disponibilité en eau.....	60

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 01 : Variation mensuelle de la demande	37
Graphique 02: Consommation réelle mensuelle pour l'année 2011	38
Graphique n°03 : Courbe de l'évolution de la population de 2011 à 2041 pour Antanety II ..	39
Graphique n°04 : Evolution de la vulnérabilité des ressources en eau pour Lohazozoro	40
Graphique 05 : Scénario de la demande non satisfaite.....	41
Graphique n°06 : Le scénario idéal pour le maintien d'approvisionnement en eau exclusif par le lac Lohazozoro	41
Graphique n° 07 : L'évolution des régimes climatiques de 2011 à 2041	43
Graphique n°08 : Evolution de la satisfaction de la demande en eau suivant l'évolution du climat pour la période de 2011 à 2041	44

INTRODUCTION

Rapport-Gratuit.com

INTRODUCTION

Etant à la fois habitat, aliment, moyen de production, de transport et bien marchand, l'eau est une ressource naturelle multifonctionnelle et multidimensionnelle. De plus, elle est liée aux autres ressources naturelles (sol, forêt, biodiversité, etc.) et différents groupes d'intérêts l'utilisent pour subvenir à leurs besoins. [9]

Pourtant, une croissance démographique, une urbanisation grandissante ainsi que des progrès réalisés en termes d'industrialisation se combinent pour créer une demande en eau toujours plus importante. Les écosystèmes, milieux producteurs et régénérateurs de cette ressource, sont menacés, pollués et détruits faisant de l'eau une source de concurrence et de conflits. L'eau est une ressource menacée. [9]

Avec les effets du changement climatique apparaissant sous forme de saisons de pluies violentes et irrégulières, de crues, d'inondations, de glissements de terrain, de sécheresses prolongées, l'eau est ainsi devenue une ressource naturelle menaçante. Sa gestion fait alors appel à une *gestion intégrée*. A cet effet, des études sur la vulnérabilité des ressources en eau face aux changements climatiques ont vu le jour tout récemment pour pouvoir anticiper sur la disponibilité de cette ressource dans le temps et dans l'espace. Ces études ont été conduites avec des méthodologies différentes et apparemment lourdes pour des fins professionnels. Notre pays n'échappe pas, lui aussi, à ce problème de manque de ressource en eau ; ce qui nous a amené à réaliser, par le présent document, un travail sur la recherche d'une méthodologie pratique pour être appliquée aux lacs malgaches. Ce travail s'intitule « *Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux variations climatiques, critiques méthodologiques : cas du Lac Lohazozoro* ». Ce document est divisé en quatre grandes parties. D'abord, on va faire un aperçu global sur les questions de vulnérabilité, leurs méthodologies d'étude et sur les contextes actuels des ressources en eau à Madagascar par les états de connaissances. Ensuite on va voir la manière dont on a procédé pour effectuer ce travail sur les critiques méthodologiques quant à l'étude de la vulnérabilité d'un lac à travers la rubrique des matériels et méthodes ; et ceci, pour aboutir aux résultats, quant à la méthodologie la mieux adaptée. Ce document se termine par des séries de recommandations méthodologiques pour d'éventuelles continuités de cette recherche.

PARTIE 1 :

ETAT DES CONNAISSANCES

PARTIE I : ETAT DES CONNAISSANCES

I.1. LES RESSOURCES EN EAU FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES A MADAGASCAR

I.1.1. Les ressources en eau à Madagascar : une eau continentale à réseaux hydrographiques denses

Les ressources en eau de la Grande Iles sont constituées par : les eaux continentales (lacs, fleuves, rivières), les apports pluviométriques, et les eaux souterraines.

Selon les études menées par DANLOUX et son équipe, le relief malgache divise naturellement le réseau hydrographique en cinq ensembles de versants d'importance très inégale : les versants de la montagne d'ambre (1,8% de la surface de l'Ile), les versants du Tsaratanàna (3,3% de la surface de l'Ile), le versant Est (25,2% de la surface de l'Ile), le versant Ouest et Nord Ouest (61,3% de la surface de l'Ile) et le versant du Sud (8,2% de la surface de l'Ile). [3]

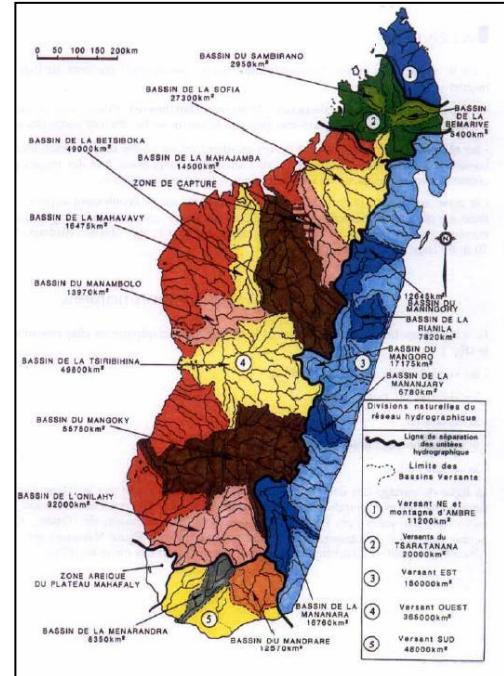


Figure 01 : Réseaux hydrographiques et bassins fluviaux de Madagascar

Source : CHAPERON, P., DANLOUX, J., FERRY, L., Fleuves et rivières de Madagascar, ORSTOM, Paris, 1993, 874p

I.1.2. Les lacs malgaches : 1300 lacs continentaux et littoraux

Etymologiquement, le terme *lac* vient du mot latin « *lacus* » qui signifie une grande étendue d'eau intérieure, généralement douce, d'origine diverses (tectonique, volcanique, glaciaire, ...). [4]

Les lacs font partie des milieux lenticques avec les marais, les lagunes, les marécages, les étangs et les tourbières. Les lacs sont de deux sortes : les lacs continentaux et les lacs littoraux. L'ensemble des lacs, à Madagascar, occupe une superficie totale de 2000 km² et actuellement 1300 lacs (avec les lagunes) ont été recensés sur tout le territoire de Madagascar.

Dans la Grande Ile, les lacs sont généralement d'origine *tectonique*¹, *volcanique*², mais il y a également les *lacs artificiels* (lacs des barrages³, lacs et réservoirs d'eau artificiels⁴).

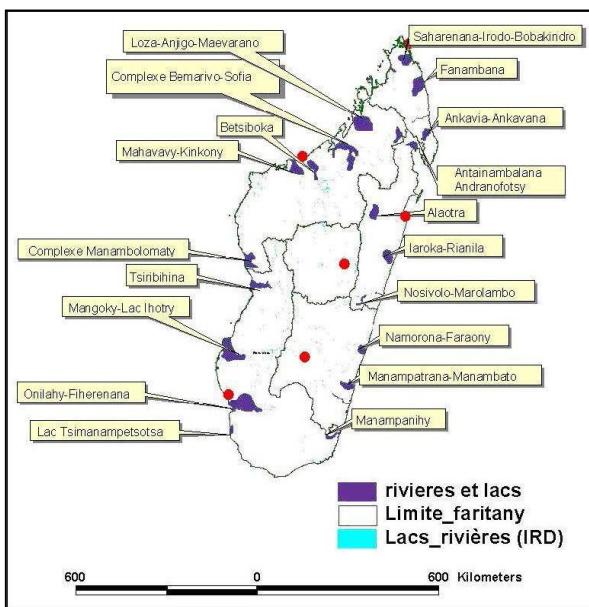


Figure 02 : Répartitions des Rivières et quelques Lacs importants
Source : Ministère des eaux et Forêts

D'après le Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar [12], la disponibilité en eau, aussi bien pour les eaux souterraines que les eaux de surface par an est résumée comme suit: eau de pluie 900 000 million m³, eaux de surface 355 000 million m³ et eaux souterraines 140 000 million m³.

I.1.3. Le changement climatique à Madagascar : entre inondation fréquente et sécheresse prolongée

A Madagascar, le changement climatique est une réalité dont les conséquences se font ressentir depuis quelques temps. Les températures ont augmenté ces dernières décades : 21,5°C à 22,4°C dans la moitié Sud. Les précipitations sont devenues plus intenses entraînant

¹ Lacs tectoniques sont dus à des accidents tectoniques, se présentant généralement sous forme de failles, comme le cas du lac Alaotra (220 km²). Ce type de lac est généralement de forme allongée. Lacs de plaines sont localisées surtout dans la partie Ouest de Madagascar. Ils sont caractérisés par leur faible profondeur et se rencontrent dans des zones où le drainage est mal assuré ; Leur superficie varie suivant les saisons (saison sèche et saison de pluie). Cas des lacs Bemamba, Bemarivo, Kimanomby, Ibokoka, Hima, ...)

² Lacs volcaniques sont des lacs formés dans des cratères. Ils sont généralement de forme arrondie ou ovale, de superficie relativement faible et de profondeur souvent élevée. Ils forment plusieurs chaînons dans des zones volcaniques. Cas des lacs du moyen ouest (Itasy, Andranotoraha, Amparikhikisoa,...), de la montagne d'Ambre (Grand lac, petit lac,...) de la région du Vakinankaratra (Tritriva, Andraikiba...), Nosy be (avec 12 petits lacs).

³ Les lacs de barrage naturel sont piégés dans des vallées ou des bas-fonds par de vastes éboulis ou alluvions. Cas du lac Ihotry et du lac Kinkony.

⁴ Lacs et réservoirs d'eau artificiels sont des lacs aménagés à des fins hydroélectriques (Mantasoa, Tsiazoampaniry,...), pour l'irrigation des zones agricoles comme dans la région de Marovoay, ou pour l'approvisionnement en eau des villes comme le lac de Mandrozeza.

l’augmentation des risques d’inondation. Les périodes sèches ont tendance à s’allonger sur les Hauts Plateaux et la côte Est ; tandis que sur la région occidentale, les pluies sont devenues plus intenses. [11]

L’augmentation de la fréquence et de l’intensité des phénomènes météorologiques extrêmes tels que la sécheresse, l’inondation et les cyclones de catégories 4 à 5 (dont le nombre moyen dans le sud de l’Océan Indien est passé de 23 entre 1975-1989 à 50 entre 1990-2004) ; l’élévation du niveau de la mer (estimée à 7 et 8 mm par an) et les impacts induits (baisse de la production agricole, insuffisance de la disponibilité en eau pour l’irrigation et les usages domestiques, la perte de la biodiversité et des pâturages, des pertes en vies humaines, la destruction des infrastructures, l’érosion côtière, la recrudescence et l’émergence des maladies infectieuses, etc.) montrent combien notre pays est vulnérables aux effets néfastes du changement climatique. [11].

I.1.4. Cadre institutionnel sur le secteur de l’eau à Madagascar : partant du MAP

Le MAP ou le Madagascar Action Plan (vision 2007 – 2012) est l’aboutissement d’une longue série d’initiatives pour le secteur de l’eau à Madagascar. Ceci débute par le Plan d’action stratégique pour le secteur de l’eau et de l’assainissement (en1991) puis vient ensuite la Déclaration d’une politique sectorielle de l’eau et de l’assainissement (en1997) et le Code de l’eau (1998), suivi des décrets de mise en application en 2003.

En 1999 a été créée l’*Autorité Nationale De l’Eau et de l’Assainissement* (ANDEA), un organisme national qui a du mal à remplir son mandat initial de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

En 2005, le Programme National d’Approvisionnement en Eau Potable et d’Assainissement (PNAEPA) est inclus dans la politique générale de l’Etat. Le budget et le plan de travail du PNAEPA prenaient une attention détaillée aux ressources financières et humaines et aux systèmes de suivi et d’évaluation.

En 2006, la conférence annuelle d’examen de la situation de l’eau et de l’assainissement réunissant le gouvernement et les donateurs marque un tournant et pose les bases d’une approche sectorielle, dont la création d’une agence de régulation de l’eau, la SOREA (Organisme régulateur du service public de l’eau et de l’assainissement). L’année 2007 voit la naissance de la *Direction de l’Eau Potable et de l’Assainissement* (DEPA). En 2008, la formulation de la *Politique et Stratégie Nationale de l’Assainissement* (PSNA) constitue un

nouveau pas en avant vers l'élaboration d'une stratégie nationale de l'eau et de l'assainissement. Ce document répartissait les tâches entre les différents ministères concernés par l'assainissement. Ces structures sont maintenant remplacées par le nouveau Ministère de l'Eau. Il reste encore à réévaluer le PSNA à la lumière de la nouvelle structure de gouvernance. [20]

I.2. LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

I.2.1. Définition de la vulnérabilité : des notions divergentes mais complémentaires

I.2.1.1. La vulnérabilité associée aux termes « capacité d'adaptation, sensibilité et exposition » au changement climatique

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ou GIEC définit la vulnérabilité au changement climatique comme étant le « *Degré selon lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère¹, de l'ampleur² et du rythme³ des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation⁴.* » [7] [15]

I.2.1.2. La vulnérabilité dans un sens socio-économique

Etymologiquement, la vulnérabilité a été tirée du latin « *vulnerare* » ou blesser et donc, un être vulnérable est une personne qui du fait d'une constitution fragile est susceptible d'être blessée. Autrement dit, c'est le « *Caractère vulnérable de quelque chose ou de quelqu'un* » [5]. Par ailleurs, la FAO (Food and Agricultural Organization) a évoqué le principe de la vulnérabilité dans un sens socio-économique comme étant : « *la mise en adéquation de la quantité d'eau dont dispose un pays avec la répartition dans le temps de cette quantité disponible, sa qualité, le niveau de consommation et celui de la demande. Il s'agit, au final,*

¹ **Caractère** : Ce qui est propre à un problème découlant des changements climatiques; le type de problème avec ses caractéristiques structurelles qui permettent de le distinguer d'un autre problème.

² **Ampleur** : Mesure du degré d'affectation du système par un problème découlant des changements climatiques. Plus l'ampleur de ce problème est grande, plus l'impact est grave.

³ **Rythme** : Le rythme d'un problème est induit par la répétition du phénomène qui l'occasionne, quelle que soit sa nature. Dans le contexte des changements climatiques, le rythme se décrit donc comme la succession répétée d'événements découlant de la perturbation du climat.

⁴ **Capacité d'adaptation** : Capacité d'ajustement d'un système face aux changements climatiques (y compris la variabilité climatique et les extrêmes climatiques), afin d'atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités ou de faire face aux conséquences encourues. La sensibilité du système à l'impact en détermine la capacité d'adaptation. Cette sensibilité correspond au degré d'affectation positive ou négative du système par des stimuli liés au climat. L'effet peut être direct (par exemple : modification du rendement agricole en réponse à une variation de la moyenne, de la fourchette ou de la variabilité de la température) ou indirect (par exemple : dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières en raison de l'élévation du niveau de la mer).

de déterminer le « degré de vulnérabilité » pour l'eau, du pays considéré » [6]. Mais cette définition met au centre des préoccupations le secteur agricole.

Néanmoins, ces divergences d'opinion se complètent par le fait que l'eau est multidimensionnelle et intègre bon nombre d'utilisateurs. Dans cette étude, on a combiné ces deux aspects de la vulnérabilité.

I.2.2. Principe de la vulnérabilité : comparaison entre disponibilité en eau et usage de l'eau

Selon BORDET, le principe de la vulnérabilité est un concept permettant de déterminer statistiquement le degré de vulnérabilité régionale pour les ressources en eau (c'est-à-dire « *le niveau de l'utilisation de l'eau* » par rapport « *aux disponibilités en eau* »).

Les disponibilités en eau prennent en compte deux variables: le « *climat* » et le « *taux d'évapotranspiration de l'eau de pluie* ».

Le niveau de l'utilisation de l'eau, dépendent de trois variables principales à savoir : les « *facteurs institutionnels* », le « *taux d'accroissement de la population* »¹ et le « *niveau de développement* ».² [2] [18]

Toujours selon BORDET, le seuil de vulnérabilité est atteint lorsque les ressources internes renouvelables en eau sont inférieures à 1000 m³ par habitant.

I.3. LES REALISATIONS CONCERNANT LES METHODES D'ETUDE DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU

I.3.1. Etude de la vulnérabilité : une idée de standardisation des indicateurs

L'étude de la vulnérabilité a émergé tout récemment comme étant l'un des concepts central pour la recherche de l'évolution de l'environnement et cette étude a été conçue pour fournir les indicateurs de vulnérabilité d'une ressource quelconque. Ce concept s'avère être important du fait de son approche inclusive et dans cette perspective, l'homme et l'environnement sont interdépendants. Ce concept d'inclusivité complique bien des analyses et fait naître d'importantes questions méthodologiques. Ces questions se concentrent en une seule qui est :

¹ Pour « *le taux d'accroissement de la population, on prend en compte la seconde variable clé, à savoir « le niveau de développement », mais aussi deux sous-variables que sont « le taux de la production alimentaire accrue » et « le degré d'urbanisation* ». Le taux de la production alimentaire accrue est lui-même fonction de « *la demande alimentaire* » (elle-même fonction des « *besoins en irrigation* ») et de « *la demande en productions animales* » (elle-même fonction du « *nombre de têtes de bétail* »).

² Pour le niveau de développement économique, lui-même partiellement fonction du « *taux d'accroissement de la population* », dépend du « *niveau de revenu* », qui dépend lui-même d'une part de la « *demande en productions animales* » (fonction du « *nombre de têtes de bétail* ») et d'autre part de la « *demande en produits industriels* ».

« *Est-ce que les indicateurs de vulnérabilité produits suite à ces différentes méthodologies d'évaluations sont facilement comparables les uns des autres pour converger vers une conclusion commune sur l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation d'une zone donnée ?* ». D'après POLSKY, il y a là une nécessité de standardiser les données, pour établir une structure commune, d'autant plus que l'étude de la vulnérabilité traite généralement des variables qualitatives. Ceci est indispensable dans un objectif de comparaison de résultats entre diverses études employant des méthodologies différentes. Les études menées par ce dernier visent à énumérer, au final, des indicateurs de vérification standardisés de la vulnérabilité d'une ressource. Néanmoins, les chercheurs dans le domaine de la vulnérabilité d'une ressource font toujours face à un challenge de structuration des évaluations de la vulnérabilité (notamment pour les études de petites envergures) pour que les résultats puissent être comparables afin de soutenir sa validité. [14]

I.3.2. Les différentes méthodologies pour l'étude de la vulnérabilité: méthodologies différentes mais complémentaire

I.3.2.1. L'approche « Eight steps » de SHROETER et al.

L'approche “Eight steps”, créée en 2005, est une méthode d'étude de la vulnérabilité et présente huit étapes à franchir par ordre chronologique d'où son nom. Cette méthodologie a été inventée par l'équipe de SHROETER et est représentée par la figure qui suit :

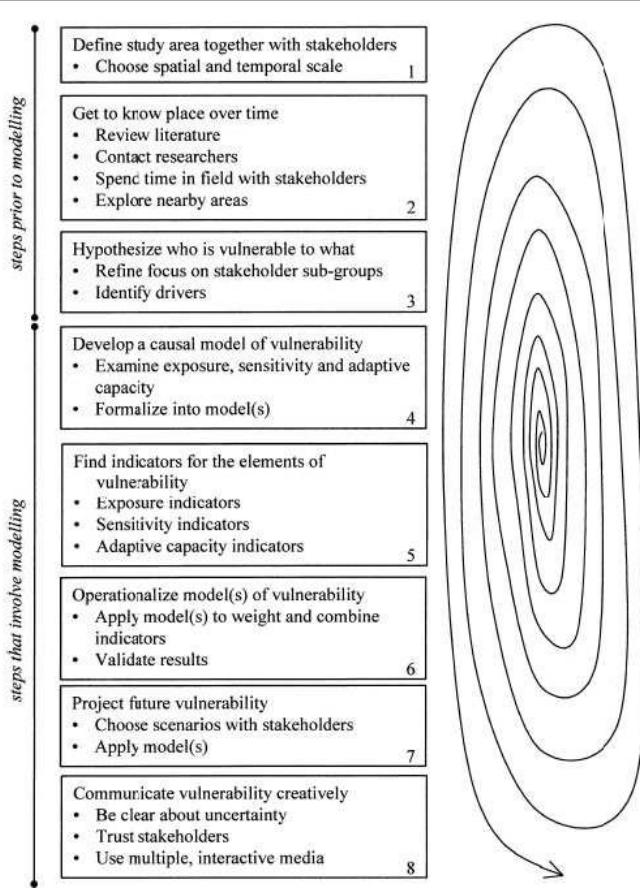


Figure 03 : Approche en 8 points de l'évaluation de la vulnérabilité de SCHROTER

Source: ROUDIER, 2008, Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique

Ainsi, les étapes adoptées pour l'approche « Eight steps » dans l'étude de la vulnérabilité des ressources en eau sont cités ci-dessous :

- (1) définir la zone d'étude ainsi que les acteurs en jeu ;
- (2) connaître l'état des lieux dans le temps et dans l'espace;
- (3) définir l'hypothèse selon laquelle qui est vulnérable par rapport à quoi ;
- (4) développer un model d'interprétation de la vulnérabilité ;
- (5) trouver des indicateurs pour les éléments de la vulnérabilité ;
- (6) rendre opérationnel les models de la vulnérabilité ;
- (7) projeter dans le futur la vulnérabilité ;
- (8) communiquer d'une manière créative la vulnérabilité ;

Par ailleurs, les utilisateurs ne sont pas obligés de suivre ces 08 étapes pour aboutir à une analyse complète de la vulnérabilité, mais ils peuvent insérer d'autres étapes.

Le “Eight steps” est connue pour sa complexité et sa difficulté à standardiser les données ou plus précisément les indicateurs de vérification de la vulnérabilité en cas de comparaison avec d'autres méthodologies. Aussi, certains auteurs, comme POLSKY, a mis au point une autre

méthodologie qui allège l'approche « Eight steps » en facilitant certaines de ces étapes : c'est le « Vulnerability Scoping Diagram » ou le VSD. [14] [17]

I.3.2.2. Le Vulnerability Scoping Diagram (VSD) de POLSKY et al.

a) Une analyse fondée sur les trois dimensions de la vulnérabilité: exposition, sensibilité et capacité d'adaptation

Avec le Vulnerability Scoping Diagram (VSD), initié par POLSKY en 2007, la vulnérabilité est fonction de trois dimensions principales qui sont : l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation comme celles citées plus haut. (cf. Paragraphe I.2.1. Définition de la vulnérabilité) [14].

Le Vulnerability Scoping Diagram permet en fait d'arriver à l'étape n°5 des 8 précédemment présentées par l'approche « Eight steps ».

b) Le diagramme : un tri cercle concentrique de représentation de la vulnérabilité

Le diagramme dans le Vulnerability Scoping Diagram permet de construire une base pour effectuer des comparaisons d'évaluation faites à des périodes et à des lieux différents et d'offrir un point de départ pour comprendre les détails de la vulnérabilité dans un ensemble qui pourra être étudié plus en détail par la suite. Le Vulnerability Scoping Diagram est imaginé par un cercle à trois anneaux comme nous l'indique la figure ci-après.

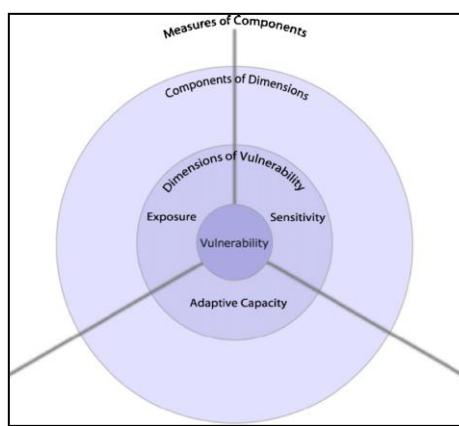


Figure 04: Forme Générale du Vulnerability Scoping Diagram
Source: POLSKY, C., NEFF, R., YARNAL, B., Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram

Le centre du diagramme représente la vulnérabilité d'un système homme environnement donné. Le premier anneau exprime la vulnérabilité dans ses trois dimensions (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation). L'anneau intermédiaire représente les composants ou le

résumé des caractéristiques servant à évaluer chacun des trois dimensions de la vulnérabilité. L'anneau extérieur exprime les mesures ou les variables observables pour tous les composants des dimensions. [14]

**c) L'utilisation du diagramme : remplissage des champs
composants des dimensions et mesures des composants**

Les champs *Components of Dimensions* (composants des dimensions) et *Measures of Components* (mesures des composants) pour les trois dimensions sont ceux qui sont à remplir par l'utilisateur donnant ainsi les indicateurs de la vulnérabilité. [14] [17]

❖ **Les composants des dimensions** expriment les caractéristiques des trois dimensions (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation) pour un couple homme environnement donné. Aussi, les composants du degré d'exposition caractérisent le stress et les entités sous stress, tandis que les composants de la sensibilité caractérisent les effets des stress. Enfin, les composants de la capacité d'adaptation caractérisent les réponses aux effets des stress.

❖ **Mesures des composants** en VSD sont les variables observées et enregistrées pour un composant spécifié. Ces mesures peuvent être quantitatives ou qualitatives.

Avec le VSD, l'utilisateur a besoin de spécifier cinq éléments :

- *le risque*¹ et les impacts envisagés ;
- *l'unité d'exposition*² ;
- les *dimensions* ;
- les *composants* ;
- *les mesures* du processus de vulnérabilité en question. [14]

I.3.2.3. Le Water Evaluation And Planning system (WEAP) : Outil de planification de gestion intégrée des ressources en eau

a) Contexte : un programme pour micro-ordinateur

Le Water Evaluation And Planning system ou WEAP vise l'incorporation des valeurs suivantes dans un outil pratique pour la planification des ressources en eau : la demande, la qualité de l'eau et la préservation de l'écosystème. [16] [19]

¹ **Le risque:** évènement qui menace la population ainsi que le couple Homme environnement.

² **L'unité d'exposition :** affecte directement le couple Homme environnement qui peut être vulnérable par le risque en question. Il doit inclure les paramètres clairement identifiés dans le temps et dans l'espace concernant la population et les caractéristiques environnementales de la zone.

L’Institut de l’Environnement de Stockholm (*Stockholm Environment Institute*) a fourni le support fondamental pour le développement de WEAP en tant que logiciel. Des agences, incluant la Banque Mondiale, l’USAID et le « *Global Infrastructure Fund of Japan* » ont fourni des projets supports. Par ailleurs, WEAP a été appliqué pour l’évaluation de l’eau pour un plan d’aménagement des ressources en eau dans des douzaines de pays incluant les Etats Unis, le Brésil, le Mexique, l’Allemagne, le Ghana, la Burkina Faso, le Kenya, l’Afrique du Sud, le 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. [19]

b) Principe de base de WEAP : la balance de la ressource en eau

Le Water Evaluation And Planning system ou WEAP opère avec les principes de base de la balance d’eau. Les applications de WEAP incluent les étapes suivantes:

- La *définition de l’étude* qui identifie la période de simulation, les limites spatiales, les composantes du système et la configuration du problème.
- L’*Etat Actuel*, qui peut être considéré comme une étape de calage dans l’élaboration d’une application. Il fourni une vue instantanée de la demande en eau actuelle, de la charge de pollution, des ressources et des fournitures pour le système. Les hypothèses de base doivent être construites dans cet Etat Actuel pour représenter les facteurs qui affectent la demande, la pollution, la fourniture et l’hydrologie.
- Les *Scénarii*, qui sont construits sur la base de l’Etat Actuel. Ils permettent d’explorer les impacts des hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité et l’usage de l’eau dans le futur.
- Finalement les Scénarii sont *Evalués* à l’égard de la suffisance de l’eau, des coûts et des bénéfices, de la compatibilité avec les objectifs environnementaux et à l’égard de la sensibilité à l’incertitude dans l’estimation des variables clés. [16] [19]

Le Water Evaluation And Planning system consiste en cinq vues principales pour la représentation des scénarii: Schéma, Données, Résultats, Schémas Synoptiques et notes.

I.3.2.4. L’approche par indicateurs de ROUDIER

Plusieurs chercheurs comme SULLIVAN et MEIGHT en 2005, ou encore CHAVES et ALIPAZ en 2007, ont avancés des théories selon lesquelles la vulnérabilité au changement climatique est mesurable moyennant des indicateurs climatiques. De cette idée est née l’approche par indicateur. Les indicateurs pris en compte dans cette approche sont catégorisés en trois groupes :

- les indicateurs dits « globaux » qui utilisent des sous indices comme le **Watershed Sustainability Index**, le **Water Poverty Index 1** ou encore le **Climate Vulnerability Index**;
- les indicateurs dits « moins globaux » qui n'évaluent qu'une partie de la vulnérabilité ;
- les indicateurs dits « très simples » qui sont mesurables directement.

ROUDIER, en 2008, a effectué une étude sur la vulnérabilité des ressources en eau superficielle dans un bassin versant soudano-sahélien, le bassin versant de Bali au Mali et a opté pour la méthode d'approche par indicateur. Compte tenu d'une insuffisance de base de données, ROUDIER a choisi des indicateurs simples. Ce choix a permis de :

- connaître le stress hydrique existant dans le bassin versant en question (sécheresse ou inondation) par le *Climatic Moisture Index* et des données pluviométriques simples;
- définir la sécheresse (le stress hydrique) dans tous ses aspects tels que la fréquence, l'intensité et la durée par le *Standardized Precipitation Index* avec un pas de temps de 10 jours. Cette définition de la sécheresse a été insatisfaisante à cause du pas de temps utilisé qui aurait dû être journalier, alors l'auteur a utilisé le *Effective Precipitation Index* pour une mesure journalière des caractéristiques de la sécheresse (sa durée, son nombre et son évolution dans le temps). [17]

I.3.2.5. Le « Vulnerability Spider Diagram » ou Diagramme en toile de la vulnérabilité

Le « Vulnerability spider diagram » ou Diagramme en toile de la vulnérabilité est une méthodologie d'étude de la vulnérabilité apparenté au Vulnerability Scoping Diagram mais de portée plus petite. Il a été conçu pour être polyvalent dans l'étude de la vulnérabilité de toutes ressources face au changement climatique (ressources financières, ressources renouvelables, ressources matérielles). Cette méthodologie est très utilisée dans plusieurs pays d'Amérique et d'Afrique et elle n'inclut pas les trois dimensions de la vulnérabilité (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation). HAHN et son équipe ont réalisé, au Mozambique, des études sur la vulnérabilité des revenus des paysans face au changement climatique avec le Vulnerability Spider Diagram. Le résultat est illustré par la figure ci-dessous [8].

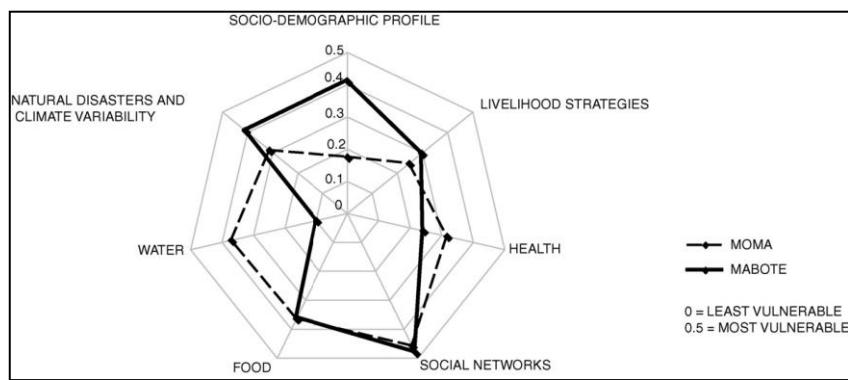


Figure 05: Vulnerability spider diagram of the major components of the Livelihood Vulnerability Index (LVI) for Moma and Mabote Districts, Mozambique.

La toile est multiaxiale et elle est remplie en attribuant des valeurs à chaque indicateur. Plus on se rapproche de zéro, moins l'indicateur mentionné au sommet de chaque axe est vulnérable au changement climatique.

PARTIE 2 :

MATERIELS ET METHODES

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

II.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES

II.1.1. La dégradation environnementale et le tarissement des lacs : une nécessité d'anticiper le futur des ressources en eau

La dégradation de l'environnement devient trop importante actuellement suite aux activités anthropiques et à une pression démographique importante dans les grandes agglomérations telle qu'Antananarivo. Cette dégradation accentue le réchauffement climatique qui bouleverse le climat en général créant ainsi une longue saison sèche et un rétrécissement de la saison de pluie. Ce bouleversement aboutit au tarissement des ressources en eau pour lequel les lacs sont les plus exposés. Ainsi, la capacité des lacs à approvisionner en eau les habitants devrait être tracée en fonction du temps ce qui ramène à l'étude de sa vulnérabilité qui est la différence entre la disponibilité en ces ressources et son niveau d'utilisation.

Ainsi, la connaissance de la vulnérabilité d'une ressource en eau permet de prévoir son usage et définir les mesures à prendre en retour pour que la disponibilité puisse satisfaire les besoins en eau. Or à Madagascar, la vulnérabilité des ressources en eau, surtout dans le cas des grandes agglomérations, n'est pas réellement quantifiée pourtant un manque d'approvisionnement en eau, notamment dans la ville de Fianarantsoa et d'Antananarivo, a été inévitable ce dernier temps.

Par ailleurs, en ce qui concerne les lacs, aucune étude n'a été réalisée jusqu'ici, à Madagascar, quand à leur vulnérabilité et surtout si ce lac alimente un centre urbain comme Antananarivo pourtant une meilleure gestion de l'eau nécessite la connaissance de la vulnérabilité des ressources en eau de ces lacs.

II.1.2. Existe-il alors un outil plus pratique pour la mesure de la vulnérabilité des lacs malgaches ?

La plupart des méthodologies pour l'étude de la vulnérabilité avancées par certains auteurs sont à l'échelle d'un bassin versant tout entier alors que les lacs sont un des éléments dans un bassin versant. Par ailleurs, il se trouve que ces méthodologies sont moins pratique eu égard à l'insuffisance de base de données disponibles à leur utilisation à Madagascar. En effet, le pays ne dispose pas d'outils performants et de données complètes pour pouvoir réaliser en bonne et dû forme ces méthodologies, aussi des improvisations s'imposent si on veut réellement mener une étude sur la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs malgaches.

Bon nombre de pays d’Afrique présente le même problème de base de données que le notre en matière d’étude de la vulnérabilité des ressources en eau et ils ont choisi le Water Evaluation And Planning system comme outil d’analyse de la vulnérabilité des ressources en eau comme c’est le cas au Mali et au Burkina Faso. Par ailleurs, des études sur la vulnérabilité des ressources en eau à l’échelle d’un bassin versant (bassin versant de Morondava Madagascar, et le bassin versant du Bali au Mali, réalisées en 2007), ont opté pour la méthode d’approche par indicateur avec une modélisation par le logiciel WEAP (Water Evaluation And Planning system) comme outil d’exploitation des données et de montage de scénario d’évolution de la ressource. [16]

On a pensé que peut-être ce Water Evaluation And Planning system pourrait constituer l’outil recherché compte tenu des réalisations faites avec cet outil dans des pays d’Afrique où les données disponibles pour l’étude de la vulnérabilité d’une ressource sont défaillantes.

II.1.3. Serait-il possible de quantifier la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs malgaches ?

Des séries de questionnement, qui méritent des éclaircissements, se posent quant à l’ampleur de l’étude d’une vulnérabilité des ressources en eau pour les lacs. La première est : « La vulnérabilité des ressources en eau d’un lac est-t-elle réellement quantifiable? ». Cette question entraîne une autre qui est : « Comment peut-on alors quantifier cette vulnérabilité? ».

Théoriquement, la réponse en est que la quantification de la vulnérabilité des ressources en eau peut être obtenue en mesurant la disponibilité en eau et son usage et il existe une valeur seuil permettant de soutenir qu’une ressource en eau est vulnérable par rapport au changement climatique mais malheureusement l’existence cette valeur seuil suscite bien des polémiques puisqu’elle varie selon le contexte social de la zone.

Dans la pratique, les méthodologies d’étude de la vulnérabilité des ressources en eau ne précisent pas une quantification réelle de celle-ci pourtant quantifier la vulnérabilité aide, au final, à tracer l’évolution du maintien de l’approvisionnement en eau. Les points à éclaircir dans ce cas sont alors la valeur de la disponibilité, de l’usage et le traçage de l’évolution du maintien d’approvisionnement en eau, ce dernier ne pouvant se faire que par une modélisation. Il faut donc trouver des méthodes qui permettent de modéliser à partir de données existantes et du contexte.

Aussi, le principal problème à résoudre tout au long de cette étude est : « *Quel est l’outil de mesure de la vulnérabilité le plus approprié pour les lacs malgaches ?* ».

L'objectif global de ce travail de recherche sur « L'Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux variations climatiques, critiques méthodologiques : cas des lacs malgaches » est de trouver une méthodologie adaptée au contexte des lacs malgaches (pression démographique, variation climatique) pour quantifier leur vulnérabilité.

II.2. HYPOTHESES ET INDICATEURS DE VERIFICATION

II.2.1. L'hypothèse unique de travail : une hypothèse méthodologique

Etant donné que le fondement de cette recherche est de trouver une méthodologie adéquate pour la quantification de la vulnérabilité des ressources en eau pour les lacs, on a opté pour le choix d'une hypothèse méthodologique. Ceci sous entend alors un choix entre plusieurs méthodes pour voir dans la pratique celle qui est la plus appropriée au contexte des lacs malgaches. Alors, le choix s'est orienté vers le Water Evaluation And Planning system ou WEAP.

Premièrement, le WEAP est un outil de planification intégrée des ressources en eau pour microcoordinateurs. C'est un laboratoire pour examiner les alternatives de développement de l'eau et des stratégies de gestion. Ceci étant, c'est également un outil de modélisation précis pour la projection future du maintien d'approvisionnement en eau car il fourni un système de maintien de l'information de la demande et de la distribution dans des bases de données pour simuler par la suite la demande en eau, l'offre, le débit, le stockage, la génération de pollution, le traitement et la distribution grâce aux scénarii qu'il est capable de monter. [19]

Deuxièmement, le WEAP a été conçu pour être complet, simple et facile à utiliser, et tente d'assister plutôt que de substituer les planificateurs habiles. [19]

Ainsi, l'hypothèse suivante a été prise en compte : « ***Le Water Evaluation And Planning system (WEAP) est l'outil de quantification de la vulnérabilité le plus approprié pour les lacs malgaches*** »

II.2.2. Les indicateurs de vérification de l'hypothèse: basés sur des aspects pratiques

Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle le Water Evaluation And Planning system est l'outil de quantification de la vulnérabilité le plus approprié pour les lacs malgaches, on a érigé des indicateurs qui peuvent refléter d'une part l'aspect pratique de la méthodologie choisie compte tenu du contexte qui se présente sur le terrain tel que la manque de base de données ; et d'autre part, la quantification réelle de la vulnérabilité des lacs malgaches.

Ainsi, quatre types d'indicateurs ont été choisis.

A. *L'envergure de l'intervention* dans l'estimation de l'offre et de la demande : cet indicateur regroupe les paramètres généraux ou les bases de données que prennent en considération chaque méthodologie dans leur analyse de l'offre et de la demande en eau pour parvenir plus concrètement à la quantification de la vulnérabilité.

B. *L'aptitude à la projection ou la modélisation* pour aboutir à une précision de résultat et à un model (graphique ou autre) de scénario concernant l'état futur du maintien de l'approvisionnement en eau.

C. *La facilité d'usage* qui met en exergue le côté pratique quand à l'utilisation de ces méthodologies par des professionnels du métier c'est-à-dire les grandes entreprises d'exploitation du secteur de l'eau par exemple. Cet indicateur révèle également une typologie des utilisateurs de chaque méthodologie.

D. *La rentabilité économique* : cet indicateur se focalise surtout sur l'analyse coût/bénéfice simplifiée de l'utilisation pratique de chaque méthodologie.

II.3. LA METHODE UTILISEE POUR VERIFIER L'HYPOTHESE

II.3.1. Les méthodes d'analyse de la vulnérabilité prises en compte : le Water Evaluation And Planning system (WEAP) et le Vulnerability Scoping Diagram (VSD)

Parmi les méthodologies existantes pour l'analyse de la vulnérabilité des ressources en eau, le choix s'est porté sur le « Vulnerability Scoping Diagram » et le « Water Evaluation And Planning system ». Les raisons en sont que, d'une part, l'objectif de recherche adopté depuis le début est de trouver une méthode facile d'application et adaptée aux études des lacs malgaches, ce qui a disqualifié l'approche « Eight steps » étant donné sa lourdeur ainsi que le temps imparti dans la réalisation de cette étude. D'autre part, le Vulnerability Scoping Diagram est une méthode pouvant remplacer l'étape n°5 des huit comprises dans le « Eight steps » en permettant de dresser des indicateurs de vulnérabilité et ainsi parachuter les autres étapes. Par ailleurs, théoriquement, le WEAP peut quand à lui remplacer l'étape de modélisation de « Eight steps » (étape 7) pour les projections futures et seul cette méthodologie est capable de modéliser pour une projection future du maintien de l'approvisionnement en eau.

Ainsi, la complémentarité entre ces méthodes est schématisée comme suit :

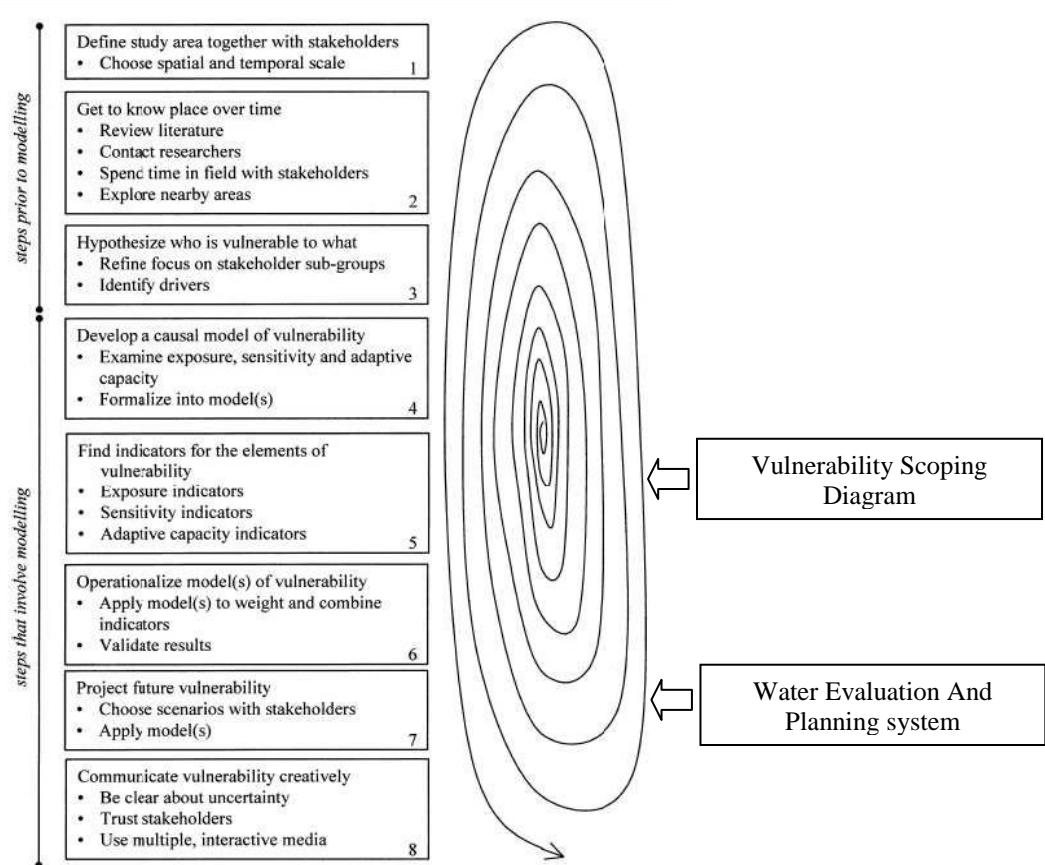


Figure 06 : Complémentarité entre WEAP, VSD et Eight steps

En outre, l'approche par indicateur de ROUDIER est en partie inclus dans le processus de WEAP mais en étant plus simple (mesures directes des indicateurs). Et le Vulnerability Spider Diagram, quand à lui, est loin de cerner uniquement le secteur eau étant donné qu'il a été conçu pour être polyvalent.

II.3.2. La méthodologie : fondée sur une analyse comparative

La démarche méthodologique entreprise est basée sur une analyse comparative entre deux méthodes d'évaluation de la vulnérabilité appliquées sur le terrain. Ainsi, deux séries d'expérimentations ont été faites.

- Expérimentation 1: avec le Water Evaluation And Planning system ;
- Expérimentation 2 : avec le Vulnerability Scoping Diagram.

II.3.2.1. Démarche générale : collecte de données suivie de traitement des données

En générale, la méthodologie adoptée tout au long de ce travail a été divisée en deux:

- La collecte des données

Cette étape a débuté par une **phase préliminaire** qui est le montage d'un plan de recherche identifiant théoriquement le contexte, les questions à soulever et les réponses possibles avant d'entreprendre les recherches. L'élaboration du plan de recherche est entièrement basée sur une collecte de données telle que les interviews réalisés auprès des concernés (le ministère de l'eau, des chercheurs dans le domaine de la gestion de l'eau à Madagascar, l'ANDEA,...), la revue bibliographique, la participation à des portes ouvertes et des forums via Internet. Ce sont les données de bases qui ont été collectées (situation générale de l'approvisionnement en eau, la gestion intégrée des ressources en eau, les variations climatiques à Madagascar, la problématique de travail, les hypothèses de travail ainsi que les indicateurs de vérification...) [1].

Ensuite il y a **le choix des méthodes d'étude de la vulnérabilité à comparer** avec le WEAP. En effet, des méthodes d'étude de la vulnérabilité des ressources en eau ont déjà été avancées dans le plan de recherche, mais pour la mise en pratique, la remise en question quant aux méthodes à comparer a été plus que nécessaire. Le choix a été fait grâce aux collectes de données par des interviews directes avec les concepteurs de ces méthodes c'est-à-dire avec le Stockholm Environment Institute pour le Water Evaluation And Planning system et le Clark University de Californie USA pour le Vulnerability Scoping Diagram.

Puis il y a le **choix de la zone d'étude**. Cette étape a été réalisée par une collecte des données auprès de la JIRAMA pour le choix du lac selon le critère pré-établi dans le plan de recherche c'est-à-dire un lac qui approvisionne en eau un centre urbain et qui est sujet à de problème d'assèchement temporaire ou permanent.

Enfin, il y a **la descente sur terrain** pour la collecte d'informations à traiter avec les méthodes WEAP et VSD. La descente sur terrain a été réalisée avec la JIRAMA et a été agencée en enquêtes (utilisant une fiche d'enquête sanitaire de la JIRAMA DEXO), observation directe (les limites du lac, les parties asséchées, l'usine d'exploitation de l'eau de la JIRAMA...) et mesure directe (pour les débits d'eau entrant). Certaines données non disponibles sur le terrain mais jugées nécessaire pour la mise en pratique ont été collectées auprès du service de la météorologie (cas de la pluviométrie).

- Le traitement des données et analyse comparative

Les données ont été traitées séparément selon qu’elles soient avec la méthode Vulnerability Scoping Diagram ou avec celle du Water Evaluation And Planning system. Par ailleurs, des échanges avec les concepteurs des méthodes WEAP et VSD ont été indispensable pour l’apprentissage et la manipulation du logiciel et du diagramme.

Après le traitement des données, l’analyse comparative a été effectuée. Cette dernière a été cadrée par les indicateurs de vérifications de l’hypothèse émise. Ces indicateurs de vérification sont alors les points les plus importants à clarifier pour pouvoir comparer les deux méthodologies (WEAP et VSD) car ils sont considérés comme outil d’aide à la prise de décision. Puis, l’analyse comparative a été clôturée par l’interprétation des résultats pour faire ressortir la méthodologie recherchée.

Les données traités ne dépendent pas nécessairement de ce que veut chaque méthodologie mais de ceux qui sont disponibles sur le terrain pour garder le côté pratique de cette étude.

II.3.2.2. Démarche spécifique pour le Water Evaluation And Planning system et le Vulnerability Scoping Diagram

a) Le Water Evaluation And Planning system

Pour le WEAP, les étapes à suivre sont :

1. Acquisition du logiciel avec son guide d’utilisation : le tutorial de WEAP. Ce logiciel est téléchargeable sur le site Internet <http://www.weap21.org> moyennant remplissage de formulaire de demande de licence d’utilisation émanant du concepteur.
2. Apprentissage de l’utilisation du logiciel en se servant du guide et des conseils donnés par le concepteur. Avec le WEAP il faut être en contact permanent avec le concepteur, le Stockholm Environment Institute grâce au forum des utilisateurs pour mieux comprendre le fonctionnement du logiciel.
3. Choix des paramètres à vérifier et/ou à mesurer sur terrain. En effet, ces paramètres doivent être des plus représentatifs des indices de vulnérabilité des ressources en eau: le nombre total de la population aux alentour, le nombre des abonnés à la JIRAMA, la capacité du lac, la superficie du lac, les usages de l’eau du lac, les activités agricoles et surfaces agricoles des alentours, la pluviométrie, la production d’eau par l’usine exploitant le lac. Ils ont été choisi par rapport aux études déjà existantes concernant l’utilisation de WEAP à l’échelle de bassin versant puis ont été réduits à l’échelle d’un Lac. Pour cela, certains paramètres n’ont pas été pris en compte.

4. Descente sur terrain et collecte de données pour la mise en pratique du logiciel.
5. Traitement des données jusqu'au montage de scénario voulu.
6. Etat de la complémentarité entre WEAP et VSD.

b) Le Vulnerability Scoping Diagram (VSD)

Pour le VSD, l'approche utilisée a été tirée des études déjà menées dans d'autres pays comme les Etats-Unis pour lesquelles des chercheurs, comme SORRENSEN et son équipe, ont étudié la vulnérabilité régionale de la disponibilité en eau face à la sécheresse (cas de l'Etat du Pennsylvanie et l'Etat du Kansas) [14].

Toutefois, certaines étapes ont été ignorées par la difficulté d'acquisition du protocole d'utilisation et de remplissage du diagramme. Ainsi, les étapes effectuées sont alors les suivantes:

1. Apprentissage de la méthodologie VSD par un contact direct avec son concepteur de Clark University California USA
2. Compilation de certaines études déjà réalisées avec le VSD dans le domaine de la ressource en eau.
3. Remplissage du diagramme avec les données disponibles
4. Etat de la complémentarité entre WEAP et VSD

II.3.3. Les matériels utilisés : le logiciel WEAP et le Diagramme pour le VSD

Les matériels utilisés pour les expérimentations des deux méthodologies sur terrain (Water Evaluation And Planning system et le Vulnerability Scoping Diagram) sont le logiciel WEAP pour la première et le Diagramme de la vulnérabilité pour la seconde. Par ailleurs, certaines étapes comme celle de la collecte des données ont nécessité d'autres matériels : un débitmètre pour la mesure du débit pour le WEAP, des fiches d'enquête généralement utilisé par la JIRAMA : le fiche d'enquête sanitaire pour la collecte d'information sur le terrain ou bien dans d'autres centres de documentations (cf. Annexe n°01).

II.3.4. Les étapes de la vérification de l'hypothèse pour chaque indicateur

Les étapes de la vérification de l'hypothèse sont cadrées par les indicateurs. Ce sont :

a) Les domaines d'interventions dans l'estimation de l'offre et de la demande en eau

Les activités entreprises sont :

- Connaître théoriquement les domaines d'interventions des deux outils
- Vérifier dans la pratique ces domaines théoriques par un cas particulier : le lac Lohazozoro de Vontovorona
- Compiler les données obtenues
- Interpréter les résultats

b) La précision d'analyse (modélisation ou autre traitement)

Les activités entreprises sont :

- Connaître théoriquement la capacité de modélisation des deux méthodologies
- Procéder aux modélisations possibles pour le cas du lac Vontovorona
- Compiler les données obtenues des deux approches
- Interpréter les résultats

c) La facilité d'usage (gamme d'utilisateurs)

Les étapes de sa réalisation ont été les suivantes :

- Evaluer théoriquement les « key personal » pour chaque étape des deux méthodologies (qualification des ressources humaines requises)
- Faire la comparaison

d) La rentabilité économique (coût / bénéfice d'utilisation)

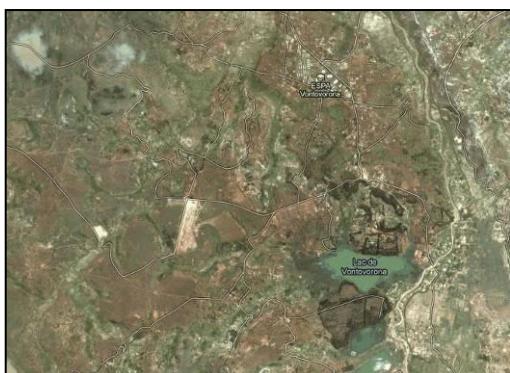
Les étapes de sa réalisation sont :

- Evaluer théoriquement le coût d'utilisation des deux méthodologies
- Estimer les bénéfices de leur utilisation pour l'évaluation coût bénéfice
- Comparer les résultats obtenus et interpréter

II.3.5. Etude de cas : le lac Lohazozoro de Vontovorona

II.3.5.1. Délimitation administrative

Le lac Lohazozoro se trouve dans le Fokontany d'Antanety II, commune rurale d'Alakamisy



Fenoarivo, district d'Antananarivo Atsimondrano et dans la région Analamanga. Il se trouve à environ 1km de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, cette dernière sise à Vontovorona. Ce lac est entièrement sous la gérance totale de la Société JIRAMA pour l'approvisionnement en eau de la cité universitaire de Vontovorona depuis 1984.

Figure 07 : Photo satellite Lac Lohazozoro

Source : Google imagerie 2011

Le Fokontany Antanety II où se trouve le lac Lohazozoro compte 8540 personnes (étudiants de l'ESPA compris) et la principale activité dans cette zone est l'agriculture avec ces 307 Ha de culture (essentiellement de la riziculture). [13]

II.3.5.2. Le lac Lohazozoro : né de la rivière Andromba

Avant l'an 1920, il y a eu une grande inondation qui a débordée la rivière Andromba se trouvant juste à moins de 100m à l'Est du lac actuel. Les dépressions aux alentours, y compris celle où se trouve le lac Lohazozoro, ont été tous inondées. Après cette inondation, une grande partie de l'eau a été emprisonnée dans la dépression où se trouvait le lac et a donné naissance au lac Lohazozoro.

Selon une étude récente menée par les étudiants de l'ESPA, Lohazozoro s'étend sur une superficie totale de 33 Ha, avec une capacité de stockage naturelle de 800 000 m³ d'eau.



Figure 08: Lac Lohazozoro près de la zone de captage de la JIRAMA

Source : JIRAMA DEXO

II.3.5.3. Lohazozoro alimenté par des petits bassins versants mais sujet à un tarissement progressif



Quatre bassins versant, contournant Lohazozoro, l'alimentent régulièrement : Mamohiadana, Andrefan'Antaramana, Manarintsoa, Andrefanambohimasina (le plus éloigné).

Figure 09: Bassin versant Andrefan'Ambohimasina

Source : Auteur



Figure 10: Vue du lac depuis le Bassin versant de

Mamohiadanana le plus proche

Source : Auteur



Figure 11 : Bassin versant Andrefan'Antaramanana

Source : Auteur

Ces bassins versants sont tous d'utilisation agricole pour la population locale et sont spécialement voués à la riziculture. Toutefois, depuis 2 ans, le lac Lohazozoro a été victime d'assèchement temporaire durant la période d'étiage, ce qui a entravé à l'approvisionnement en eau des zones alentours. La société JIRAMA a alors opté pour le pompage temporaire de la

rivière Andromba vers le lac pour palier à ce problème d'assèchement.



Notons aussi qu'en période d'étiage, les populations riveraines du lac transforment les parties marécageuses non inondées en rizière ou en bassin piscicole.

Figure 12: Riziculture sur le lac Lohazozoro

Source : JIRAMA DEXO

Par ailleurs, le lac a une réputation d'être un site touristique très prisé des Tananariviens et il y existe même quelques infrastructures touristiques qui pourraient entravé à la qualité de l'eau du lac.



Figure 13: infrastructure touristique sur le lac

Source : JIRAMA DEXO

PARTIE 3 :

RESULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE

LE WATER EVALUATION AND PLANNING

SYSTEM ET LE VULNERABILITY SCOPING

DIAGRAM

PARTIE III: RESULTATS DE LA COMPARAISON ENTRE LE WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM ET LE VULNERABILITY SCOPING DIAGRAM

III.1. DES COLLECTES DES DONNEES DEPENDANTES DES OBJECTIFS DE CONCEPTION DE CHAQUE METHODOLOGIE

La collecte des données a été d'une envergure différente en raison d'une divergence au niveau de la finalité de ces deux types de méthodologies. En effet, le Vulnerability Scoping Diagram ou VSD, conçu pour être un outil de gestion des risques et des catastrophes, requiert une plage de données beaucoup plus étendues et plus minutieuses caractérisant le risque (la sécheresse), la ressource et les bénéficiaires. De ce fait, la collecte de données est l'étape la plus importante pour le VSD car c'est à partir de ces données que peuvent être tirés les indicateurs (variables qualitatives) tant recherchés pour hiérarchiser la vulnérabilité dans ces trois dimensions (sensibilité, capacité d'adaptation, et degré d'exposition).

Par ailleurs, le WEAP, outil de gestion intégrée des ressources en eau, demande des données plus pratiques et focalisées sur la ressource en question. Ces données (ressource en eau dans la zone d'étude, débit entrant, quantité consommée, capacité du lac, nombre de population, surface agricole nécessitant une irrigation depuis la source, pluviométrie, ...) sont relativement plus facile à collecter sur le terrain ou dans des centres de documentations. De ce fait, on peut également se passer d'une mesure directe sur terrain pour le WEAP si les données sont déjà disponibles dans des banques de données.

Donc, d'une manière générale, la collecte de données avec le VSD est plus préférable du point de vue de couverture, elle est plus poussée mais par contre elle déploie bon nombre de moyens et de temps à l'instar du WEAP qui sollicite bien peu de moyens de collecte. Il est plus difficile de se tromper avec le VSD parce que toutes les informations recueillies sont en parfaites corrélations les unes des autres.

Aussi d'une manière plus explicite, cette comparaison a été illustrée dans le tableau qui suit.

Tableau n°01 : Comparaison des collectes des données pour le WEAP et le VSD

CARACTERISTIQUES	WEAP (Water Evaluation And Planning System)	VSD (Vulnerability Scoping Diagram)
But de la conception	Outil de gestion intégrée des ressources en eau	Outil de gestion des risques et des catastrophes (exposition, sensibilité et adaptation)
Portée de la méthodologie	Focalisée sur la ressource en question (l'eau)	Prend en compte trois entités: la ressource – le risque – les bénéficiaires
Collecte des données	<ul style="list-style-type: none"> • Facile pour les données génériques tels que le nombre de population, le débit d'eau, la pluviométrie, la température, la surface agricole. • Nécessite des données chiffrées pour affiner la modélisation (consommation d'eau mensuelle, les quantités eau usées, pluviométrie mensuelle, ...) • Descente sur terrain facultative 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une étude préalable indépendamment de la méthodologie VSD pour cerner la situation de la zone d'étude en tenant en compte les trois dimensions de la vulnérabilité (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation) • Collecte plus élargie dans le domaine social et nécessite une équipe pluridisciplinaire • Doit inclure une descente sur le terrain
Nature des données requises	<ul style="list-style-type: none"> • Données quantitatives à des fins de modélisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Données qualitatives (indicateurs) à des fins de hiérarchisation
RESULTAT DE LA COMPARAISON	Collecte de données globale et facile à réaliser	Collecte de données plus en détails

III.2. CHAMPS D'INTERVENTION DANS L'ANALYSE DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU : TRES VARIES POUR LE VULNERABILITY SCOPING DIAGRAM

Les champs d'intervention regroupent l'étendue des paramètres pris en compte concernant l'analyse de la demande et de la disponibilité en eau. Comme on l'a cité plus haut, le Vulnerability Scoping Diagram intègre des études approfondies couvrant de vastes domaines, ainsi les paramètres pris en compte lors de l'étude sont très variés pour être représentatifs du concept de gestion des risques et des catastrophes dans une localité donnée. A ce moment là, ces paramètres ne sont pas exhaustifs mais peuvent être changés d'une région à l'autre par

rappor t à la situation qui s'y présente. En effet, le diagramme utilisé n'est pas exhaustif et il n'est pas impératif d'utiliser les paramètres inscrits dans ce diagramme. Aussi, une improvisation et une invention nouvelle sont toujours sollicitées en VSD. L'objectif est justement d'énumérer les paramètres capables de donner une idée sur la dimension de la vulnérabilité moyennant quelques indicateurs de base appelés « composants des mesures ». Par ailleurs, étant un outil de gestion de l'eau pour microordinateur, le Water Evaluation And Planning system présente des paramètres figés qui sont déjà inclus dans la structure du programme de ce logiciel. Ces paramètres, considérés par le concepteur comme étant les plus représentatifs de la localité en question, ne sont pas interchangeables quelque soient les circonstances qui se présentent sur le terrain. Ainsi, ils sont obligatoirement à remplir et on ne peut en ajouter d'autres qui ne présentent aucune affinité avec ceux inscrits dans le logiciel. Par ailleurs, dans l'analyse de l'offre et de la demande en eau pour le WEAP, les paramètres requis sont facilement quantifiables par rapport à ceux du VSD. Les comparaisons entre ces deux méthodologies sont illustrées dans le tableau qui suit.

Tableau n°02 : Comparaison des champs d'intervention dans l'analyse de l'offre et de la demande

CARACTERISTIQUES	WEAP (Water Evaluation And planning System)	VSD (Vulnerability Scoping Diagram)
Portée de l'analyse de la demande et de la distribution	Etude de la ressource proprement dite : « eau » Repose sur des aspects pratiques	Analyse suivant les trois dimensions de la vulnérabilité : exposition, sensibilité et capacité d'adaptation Repose sur des aspects théoriques
Paramètres relevés lors de l'étude	Disponibilité en eau <ul style="list-style-type: none">• le débit entrant• le débit de retour• la pluviométrie• l'évapotranspiration Demande en eau <ul style="list-style-type: none">• le niveau d'activité annuelle (la surface agricole ou le nombre de population ayant besoin d'eau)• la consommation d'eau annuelle (valeur théorique de la demande)	Niveau d'exposition <ul style="list-style-type: none">• l'exposition de la demande en eau• la sécheresse• l'exposition de la population Sensibilité <ul style="list-style-type: none">• les technologies en adduction d'eau• la démographie• la disponibilité en eau

	urbaine pour la population et demande agricole) • la consommation réelle	
	Connexion demande et disponibilité pour connaître la non satisfaction de la demande	Capacité d'adaptation • l'accès à l'information • la structure de management • l'accès aux technologies
Traitement des données	Tous ces paramètres sont obligatoirement à traiter pour arriver jusqu'à la modélisation	Ces paramètres ne sont pas nécessairement à traiter simultanément. Le choix dépend de la situation qui se présente dans la zone d'étude.
RESULTAT DE LA COMPARAISON	Champ d'intervention plus restreint à la ressource en question (lac)	Champ plus élargi dans un contexte de changement climatique

Donc, du point de vue pratique à l'attention des professionnels de l'exploitation de l'eau, le WEAP est plus préférable puisqu'il est focalisé directement sur la ressource.

III.3. L'APTITUDE A LA PROJECTION OU A LA MODELISATION : LE WEAP DEVANCE LARGEMENT LE VSD

III.3.1. Le Water Evaluation And Planning system

Pour parvenir à une modélisation, le WEAP présente plusieurs étapes à franchir en partant de la plus élémentaire jusqu'à la plus expressive de la vulnérabilité des ressources en eau. Elles commencent toujours par la spécification de la zone d'étude, ensuite la spécification de ce qu'on appelle le « site de demande », la caractérisation de la source, la connexion entre source et site de demande et « la méthode de l'année hydrologique ».

Par ailleurs, le WEAP exige l'établissement d'un « scénario de référence » et de « compte actuel » ou état zéro pour les paramètres sus-cités. La référence est l'état pour lequel il n'y a aucun changement annuel des valeurs tandis que le « compte actuel » indique l'année du début de la période de modélisation.

III.3.1.1. La spécification de la zone d'étude : point focal du plan d'aménagement eau pour le WEAP

Le WEAP dénomme la zone d'étude « *limite du projet* » et elle est délimitée grâce à une matrice de la carte du monde déjà incluse dans le logiciel. Pour une localisation plus précise

WEAP offre des alternatives permettant:

- d'insérer une couche de SIG (Image Vecteur ou Image Raster ou carte) à la zone d'étude;
- de dessiner directement ou introduire au dessus de la zone prédefinie par WEAP divers éléments manquants (fleuves, rivières, habitations, lacs,...).

Cette spécification de la zone d'étude conduit à une planification de l'allocation de ressource dans l'espace.

III.3.1.2. La spécification de la source : basée sur le débit entrant et le débit de retour

La source est caractérisée par le débit entrant et le débit de retour. Pour le cas d'un lac, on a choisi comme débit entrant les apports capables d'alimenter le lac tels que le ruissellement depuis les bassins versants aux alentours et la quantité d'eau stockée en permanence dans la dépression qu'abrite le lac. Le débit de retour quant à lui regroupe la quantité d'eau refoulée vers le lac (eaux résiduaires et eaux non consommées).

III.3.1.3. La création du site de demande : focalisée sur la zone bénéficiaire

Plusieurs paramètres permettent de spécifier un site de demande à un autre. Ainsi, avec le WEAP, le site de demande est caractérisé par :

- son *niveau d'activité annuel* c'est-à-dire l'ensemble des activités qui suscitent l'utilisation d'eau comme les tâches ménagères, les activités agricoles et touristiques. L'unité du niveau d'activité annuelle est en nombre de population ou en hectare avec le WEAP ;
- *l'utilisation annuelle de l'eau* par unité d'activité (par habitant ou par hectare) qui est une valeur maximale de la quantité d'eau pouvant être consommée ;
- *la variation mensuelle de la demande* (facultative) ;
- *la consommation réelle mensuelle* pour l'état actuel.

III.3.1.4. La connexion entre source et site de demande : anticipation de la satisfaction de la demande

Cette connexion relie le site de demande à sa source d'eau en matière de quantité approvisionnée et de quantité refoulée. Aussi, deux types de flux d'eau se présente : celui

partant de la source vers le site à approvisionner et celui partant du site vers la source. Cette connexion renseigne sur l'état de la satisfaction de la demande en eau.

III.3.1.5. La « Méthode de l'année hydrologique » : une projection suivant le régime pluviométrique interannuel

Cette étape développe comment une variation naturelle des données climatiques (débit de rivière, pluviométrie, ...) peut être prise en considération dans WEAP à travers les analyses des scénarios. Elle implique en premier lieu comment définir les régimes climatiques (par exemple : régime très sec, sec, très humide) en comparaison à une année normale, à qui il est attribué la valeur de 1. Les années sèches ont une valeur inférieure à 1, les années très humides ont une valeur supérieure à 1.

Les étapes en sont donc les suivantes :

- A. Catégorisation du climat pour le compte actuel : le compte actuelle 2011 a été catégorisé comme appartenant au climat « Normal » pour faciliter l'étude.
- B. Définitions de l'année hydrologique : d'après le tutorial de WEAP, une échelle de valeur a été attribuée aux catégories de climat pour la création de scénario.

- climat très sec : 0,7
- climat sec : 0,8
- climat normal : 1
- climat humide : 1,3
- climat très humide : 1,45

III.3.1.6. Le scénario proprement dit : sur la base des « Hypothèses clés »

Le scénario proprement dit, tiré des scénarii de référence, est établi à partir des hypothèses clés. En fait, ces hypothèses clés différencient les scénarii proprement dits (en situation réelle) des scénarii de référence (situation imaginaire sans aucune variation interannuelle).

Ces hypothèses clés peuvent être le taux de croissance démographique (qui différencie une année à une autre), la variation climatique annuelle et on peut aussi en créer d'autres.

III.3.2. Le Vulnerability Scoping Diagram: se limite à indiquer la dimension de la vulnérabilité (capacité d'adaptation, degré d'exposition et sensibilité)

Le Vulnerability Scoping Diagram (VSD) n'offre pas une opportunité de dresser des scénarii ou de modéliser les données. En effet, il s'arrête à l'énumération des indicateurs de

vulnérabilité seulement. Par ailleurs, le VSD étant un diagramme multiaxial, on peut mettre les valeurs des paramètres recueillis sur terrain et les placer dans le diagramme pour avoir une idée de la vulnérabilité de la ressource et de sa dimension.

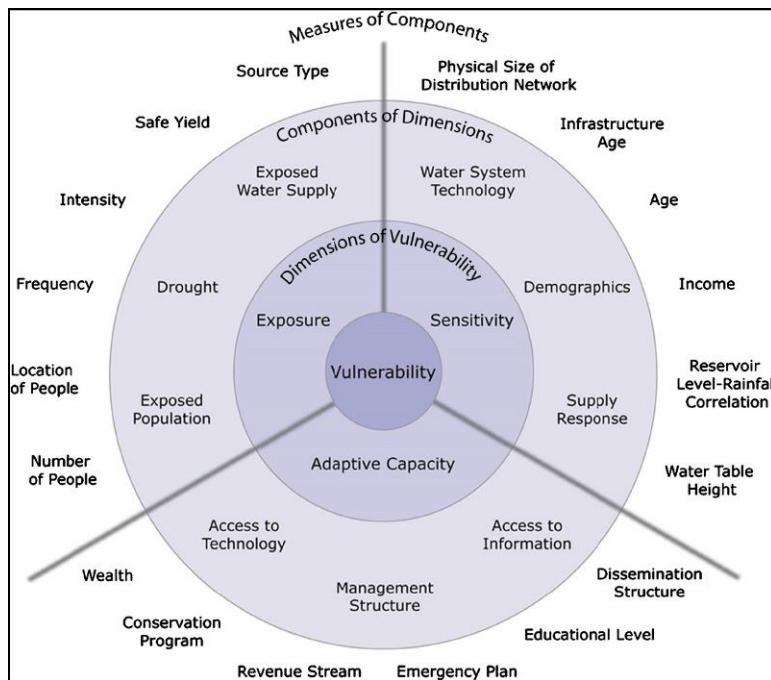


Figure 14: Diagramme d'envergure de la vulnérabilité

Pour cela, les éléments à remplir sont ceux qui se trouvent à l'extérieur du cercle. La liste des paramètres à remplir n'est pas figée mais peut être sujette à une variation. Le diagramme ci-dessous a été tiré d'une étude réalisée par POLSKY et son équipe aux Etats-Unis sur les problèmes d'adduction d'eau dans les petites communautés [14]. Les bases de données requises sont donc :

- Pour le degré d'exposition :
 - l'exposition de la demande: le type de source et le rendement en terme de satisfaction de la demande ;
 - la sécheresse (définit ici comme le risque) : l'intensité et la fréquence ;
 - la population exposée : la distance les séparant de la source et le nombre de la population ;
- Pour la sensibilité :
 - la technologie d'adduction d'eau : l'âge des infrastructures et la taille du réseau de distribution d'eau ;
 - la démographie : l'âge de la population et le revenu des ménages ;

- la disponibilité en eau : la quantité de la pluviométrie, le niveau du réservoir d'eau, hauteur de l'eau pour la source en question ;
 - Pour la capacité d'adaptation :
- l'accès à l'information : la structure de dissémination des informations et le niveau d'éducation de la population ;
- la structure de management des risques : le plan d'urgence et l'affluence des revenus ;
- l'accès aux technologies nouvelles : le programme de conservation et la richesse

Certaines bases de données sont incompréhensibles alors que d'autres le sont moins.

Pour le remplissage des valeurs, le zéro de l'axe se trouve au milieu et on peut inventer une échelle depuis le zéro de l'axe jusqu'à l'emplacement où le paramètre doit être posé. On attribue une échelle de valeur pour les données qualitatives ce qui est difficile à effectuer puisque ceci nécessite la standardisation de l'échelle de valeur en question pour être transposable sur les axes du diagramme. Ainsi, au fur et à mesure que la valeur se rapproche de zéro, la localité est de moins en moins vulnérable.

Les bases de données facilement disponibles sur le terrain sont les données relatives au degré d'exposition et à la sensibilité.

Une modélisation au moyen de scénario n'est pas réalisable avec le Vulnerability Scoping Diagram, aussi cette méthodologie sollicite d'autres outils de modélisation.

III.4. FACILITE D'USAGE : FONDEE SUR LA GAMME DES UTILISATEURS POTENTIELS

Le critère facilité d'usage tourne autour de l'évaluation des personnes clés capables de manipuler ou d'utiliser le WEAP et le VSD.

Pour ce qui est de l'étape de la collecte des données, les deux méthodologies présentent les mêmes facilités puisque cette étape ne demande pas nécessairement des personnes qualifiées. L'unique différence dans cette étape est qu'avec le VSD elle a recours à des personnes ayant une notion en changement climatique pour faire ressortir ensuite les indicateurs tant recherchés dans la méthodologie VSD.

Par contre, lors du traitement des données, on a recours à des chercheurs expérimentés pour le cas du VSD pour l'interprétation des résultats pour éviter toutes erreurs d'énumération des variables qualitatives servant à indiquer la dimension de la vulnérabilité. Par ailleurs, le WEAP peut être interprété par une personne ayant une maîtrise de l'informatique, de l'anglais ainsi qu'une notion de gestion de l'eau. Toutefois, l'avantage avec le WEAP est qu'il est aussi conçu pour être facile à utiliser même pour un profane.

Le tableau qui suit montre la gamme des utilisateurs possibles pour le WEAP et le VSD.

Tableau n°03 : Comparaison entre WEAP et VSD sur la facilité d'usage de la méthodologie

ETAPES DU TRAITEMENT	WEAP (Water Evaluation And planning System)	VSD (Vulnerability Scoping Diagram)
Collecte des données	Niveau bac pour les enquêtes Niveau de technicien supérieur pour les mesures des débits Etudiants des universités	Etudiants des universités Niveau bac pour les enquêtes Requiert une notion en changement climatique
Traitement des données (modélisation)	Requiert une personne capable de manipuler un ordinateur pour l'entrée des données. Requiert un niveau d'Ingénierat pour l'interprétation des données (pas nécessairement dans un domaine spécifique). Requiert un bon niveau d'Anglais	Chercheur avec un diplôme spécialisé en GRC Requiert une notion en changement climatique (sensibilité, capacité d'adaptation, exposition) Requiert un bon niveau d'Anglais
RESULTAT DE LA COMPARAISON	D'utilisation facile même pour un profane puisque le WEAP est toujours accompagné de son tutorial ou guide d'utilisation pratique	Spécialement destiné aux catégories de chercheurs et des spécialistes en matière de gestion des risques et des catastrophes.

Le WEAP est facile à manipuler à l'instar du VSD. L'essentiel est juste de bien suivre le guide d'utilisation fourni simultanément avec le logiciel. Par ailleurs, un projet de traduction en plusieurs langues de WEAP est en cours à la demande des utilisateurs de ce logiciel.

III.5. RENTABILITE ECONOMIQUE : RAPPORT THEORIQUE INVESTISSEMENT SUR RESULTATS DE MODELISATION

Concernant la rentabilité économique entre ces deux méthodologies, les détails ont été épargnés par faute de temps et l'essentiel a été d'évaluer théoriquement si une méthodologie est plus rentable par rapport à une autre. Les critères ainsi établis sont fonction de :

- pour l'input : la ressource temporelle (temps impari lors de son utilisation), la ressource humaine (valeur de la ressource humaine), le coût d'utilisation de la méthodologie (depuis l'acquisition du logiciel pour le WEAP jusqu'au traitement des données en passant par la collecte des données) ;

- pour le output : la qualité des résultats issus de chaque traitement des données.

Ainsi, le WEAP présente un minimum de coût pour un maximum de résultat ce qui concorde avec l'objectif que l'on s'est fixé depuis le début de ce travail : une modélisation pratique pour les techniciens et professionnels. En effet, son software est facilement disponible sur Internet gratuitement à des fins de recherche pour les étudiants et les chercheurs dans les pays en voie de développement comme Madagascar, mais il peut être onéreux à partir de 3 000 USD pour les entreprises privées. Toutefois le prix de la licence d'utilisation est négociable avec le concepteur.

Le VSD est peu rentable à l'égard des techniciens. Premièrement, le protocole, bien qu'aussi récent comme celui de WEAP, est difficile à acquérir et même son concepteur ne le donne pas facilement puisque ce protocole, contenu dans l'ouvrage de POLSKY (2007), reste flou et difficile à cerner. Deuxièmement, le critère « méthodologie pratique » n'apparaît pas avec le VSD car ce dernier déploie bon nombre de moyens financiers et temporels mais ne fournit aucune modélisation mathématique. Toutefois, le VSD est sollicitée à des fins de recherche approfondie sur les conséquences du changement climatique et les mesures d'adaptations prises.

Les résultats de cette comparaison sont illustrés par le tableau ci-dessous.

Tableau n°04 : Comparaison de la rentabilité économique entre WEAP et VSD

CARACTERISTIQUES	WEAP (Water Evaluation And planning System)	VSD (Vulnerability Scoping Diagram)
Coût d'acquisition du logiciel	Gratuit et disponible sur le site Internet pour les institutions de recherche et les universités.	Protocole non disponible gratuitement sur Internet
Ressources temporelles	Relativement courtes	Relativement longues
Ressources matérielles	Ordinateur connecté à Internet Moyen de transport sur terrain pour la collecte des informations	Ordinateur Matériels d'enquête socio-économique
Ressources humaines	Niveau technicien à bac+5	Personnels qualifiés
Performance de modélisation	Bonne (montage de scénario à partir de l'état actuel faisable)	Pas de modélisation mathématique mais une anticipation théorique
RESULTAT DE LA COMPARAISON	Rentable à l'égard des professionnels	Peu rentable à l'égard des professionnels

III.6. ENTRE LE WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM ET LE VULNERABILITY

SCOPING DIAGRAM : UNE COMPLÉMENTARITÉ

A l'issu de toutes ces comparaisons, chaque méthodologie présente ses avantages et ses inconvénients si l'on tient compte de l'aspect pratique. Ce que l'on a recherché est une méthodologie pratique pour la quantification de la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs malgaches, mais cela n'empêche pas également de voir, à part le côté pratique, la véracité du traitement et des résultats obtenus. Deux critères se trouvent donc au centre de cette problématique : une méthodologie pratique sur le terrain et précise pour la projection future.

Tout au long de cette étude, la coexistence de ces deux critères, tenu comme l'idéal, n'est pas apparu dans le WEAP comme dans le VSD pour diverses raisons.

Le Vulnerability Scoping Diagram (VSD) est une méthodologie beaucoup plus attribuée à des fins de recherches approfondies et donc elle nécessite une collecte d'informations minutieuses et atteignant plusieurs domaines pour son objectif de gestion des risques et des catastrophes. Cette phase de collecte de données constitue un point fort pour cette méthodologie puisque les données sont complètes pour ne pas enrayer les résultats. Par contre ceci rendrait moins pratique cette méthodologie surtout à l'attention des professionnels du métier de l'exploitation de l'eau par sa lourdeur. A cet effet, le VSD est d'un usage difficile pour les personnes non qualifiées et les profanes pour quantifier une vulnérabilité ; de plus , elle se contente tout simplement de fournir les indicateurs possibles d'une vulnérabilité quelconque à un risque et n'aboutit pas à des scénarios. Cette méthodologie nécessite la complémentarité avec d'autres outils de modélisation pour parvenir à une projection future de la vulnérabilité des ressources en eau.

Le Water Evaluation And Planning system (WEAP), ne peut pas être non plus l'outil idéal tant recherché répondant aux critères de précision d'analyse. Certes le WEAP permet l'établissement de scénario (de l'état zéro jusqu'à la période escomptée) mais on a trouvé que cette méthode présente une faille au niveau de la collecte des données puisqu'il met trop au centre de ses préoccupation le secteur « eau », les autres secteurs étant secondaires. Pourtant cela n'empêche pas à cette méthode d'être le plus préférable des deux à l'attention des entreprises du secteur de l'eau pour la gestion de leur exploitation. Le WEAP ne résout pas les questions d'ordre environnemental d'une manière environnementale ; il ne donne que des réponses d'ordre technique.

En bref, on précise quand même contre toute attente que le WEAP est l'outil pratique de quantification de la vulnérabilité pour le cas des lacs malgaches. Il est accessible à tout groupe d'intérêts et anticipe d'une manière concrète le futur des lacs malgaches.

III.7. LA MODELISATION POUR LE CAS DU LAC LOHAZOZORO : REALISEE

EXCLUSIVEMENT AVEC LE WEAP

Pour la modélisation du lac Lohazozoro de Vontovorona les paramètres suivant ont été pris comme éléments de base :

- La zone d'étude : Lac Lohazozoro et ses alentours pour ses caractéristiques démographiques et économiques (nombre de population, secteur d'activité, pluviométrie,...)
- Compte actuel ou état actuel: 2011
- Période du scénario : 2012 à 2041

III.7.1. La caractérisation de la source « Lac Lohazozoro »: la capacité du lac

Le débit entrant (écoulement d'une lame d'eau dans un temps) a été remplacé par la capacité du lac ($800\ 000\ m^3$) auquel s'ajoute le débit des autres ruisseaux qui alimentent le lac par l'intermédiaire des quatre bassins versants autour. Cette capacité varie suivant la saison à cause de la variation des débits des ruisseaux qui alimentent le lac. En effet, ces derniers change selon la saison (saison sèche partant du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre ; et saison de pluie partant du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril).

Une simulation a été faite pour le cas du débit des ruisseaux en saison de pluie puisque les mesures directes n'ont pu être faites qu'en période d'étiage, plus précisément en mois de Mai et Juin. Ainsi, le débit des ruisseaux en période de pluie a été doublée de celle obtenue en période d'étiage.

La quantité d'eau totale et mensuelle retenue dans le lac durant la saison sèche tourne autour de $802\ 236\ m^3$, tandis qu'en saison de pluie, elle est de $804\ 472\ m^3$.

III.7.2. La caractérisation du site de demande : le Fokontany d'Antanety II

Les paramètres vérifiés pour le site de demande Vontovorona sont : le niveau d'activité annuelle, l'utilisation annuelle de l'eau par unité d'activité, la variation mensuelle de la demande ainsi que la consommation réelle mensuelle pour 2011.

III.7.2.1. Le niveau d'activité annuel

Il représente le nombre de population et de surface cultivable ayant besoin d'eau. Pour le cas du Fokontany d'Antanety II dans lequel se trouve le lac Lohazozoro, le nombre de population s'élève à 8540 actuellement dont 1200 sont des étudiants de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. La surface agricole a été omise pour la simple raison que le lac se trouve à un niveau topographique plus bas que les surfaces agricoles aux alentours et que d'après les enquêtes entreprises, les agriculteurs n'irriguent pas à partir du lac mais à partir des sources sur les flancs des bassins versants.

Ainsi, le niveau d'activité annuel s'élève alors à 8540 unités d'activité.

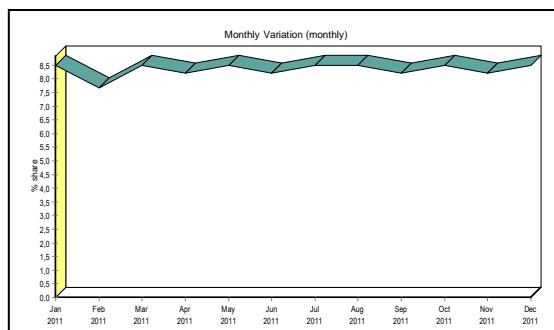
III.7.2.2. L'utilisation annuelle de l'eau par unité d'activité

C'est la quantité d'eau théoriquement consommée par habitant pendant toute l'année. Le calcul a été fait sur la base d'une consommation journalière en eau par habitant de 77 litres selon le OMS. Ceci a donné une valeur constante annuelle de 283 m³ /hab.

III.7.2.3. La variation mensuelle de la demande

La variation mensuelle de la demande ou la variation mensuelle de l'utilisation de l'eau est exprimée comme un pourcentage de la valeur annuelle de l'utilisation de l'eau. La somme des valeurs de tous les mois doit être égale à 100 % à l'échelle d'une année.

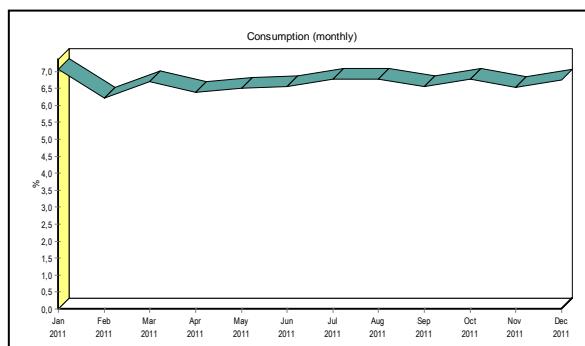
Ainsi, cette demande mensuelle atteint une valeur minimale en mois de février étant donné que ce dernier est le mois le plus court de l'année avec variation mensuelle de demande en eau de 7,7%. Le pic de variation mensuelle est apparu en Janvier et en Mars avec une valeur de 8,5% comme l'indique le graphique ci-après.



Graphique 01 : Variation mensuelle de la demande

III.7.2.4. La consommation réelle mensuelle

La consommation réelle mensuelle de la demande prise en compte est tirée de la production mensuelle d'eau de l'usine Lohazozoro de la Société JIRAMA. Une production en eau qui est directement acheminée vers les abonnés. Ainsi, la consommation réelle mensuelle présente une valeur minimale de 6,21% au mois de Février et une valeur maximale de 7% au mois de Janvier. Ceci est dû à la durée des jours effectifs d'un mois et aussi qu'en saison de pluie, la consommation d'eau augmente du fait de la chaleur. Ainsi, cette consommation mensuelle est représentée par le graphique qui suit :



Graphique 02: Consommation réelle mensuelle pour l'année 2011

III.7.3. Les connexions entre le site de demande et la source pour l'illustration des flux d'eau sortant et entrant du lac

Ces résultats représentent deux types de flux : celui partant du lac Lohazozoro vers Vontovorona et celui de Vontovorona vers le lac Lohazozoro. Ce dernier est aussi appelé « Débit de retour de l'eau » et il est évalué en pourcentage. Ce pourcentage de retour d'eau a été soustrait de la quantité mensuelle produite par l'usine Lohazozoro du volume totale de l'eau dans le lac. Autrement dit, c'est le pourcentage de l'eau non exploité.

Pour le flux allant du lac Lohazozoro vers Vontovorona, il est d'une valeur constante de $0,036m^3$ par seconde. Ceci est dû au fait que le flux, traduit en débit pour le cas allant du lac Lohazozoro vers Vontovorona n'est autre que le débit de la pompe qui alimente les réservoirs d'eau de l'usine. Pour le flux partant de Vontovorona vers le lac Lohazozoro (communément appelé « Débit de retour d'eau »), il présente une valeur moyenne de 93 % tout au long de l'année, mais une légère variation mensuelle existe (Cf. annexe n°04).

Pourtant, théoriquement, le WEAP attribue une valeur de 100% pour le débit de retour d'eau pour faciliter les calculs antérieurs. Autrement dit, pour le WEAP, toute quantité d'eau consommée refoule vers la source sous différentes formes (eaux usées, fuites d'eau).

III.7.4. Les scénarii de référence sur la base des données de l'état actuel

Ces scénarii représentent l'évolution suivant la période escomptée de la demande en eau et des débits entrants. Ils ont été conçus pour être constants tout au long de la période. Alors, la demande en eau reste constante autour de 2 400 000 m³ d'eau par an.

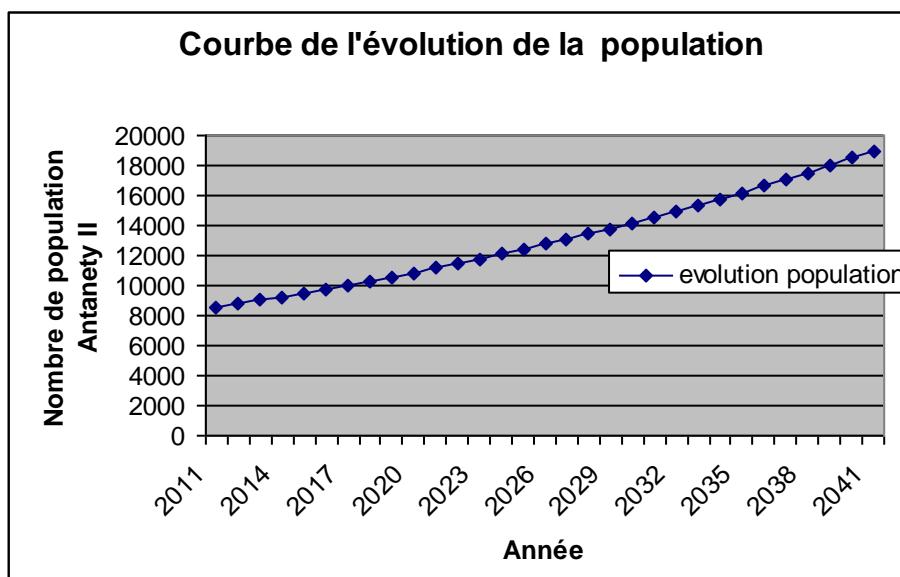
III.7.5. Les outils de base du scénario proprement dit : les hypothèses clés

III.7.5.1. Le taux d'accroissement de la population

Le seul hypothèse clé prise en compte est le taux d'accroissement de la population (2,7% selon le INSTAT). Ce pourcentage est constant chaque année et seule la demande en eau varie en fonction de ce taux d'accroissement d'une année à une autre pour la modélisation. Pourtant cette modélisation n'a pas été faite avec le WEAP par le fait qu'il exige que le débit de retour d'eau soit de 100% alors qu'en réalité ce retour d'eau ne peut pas être à 100%.

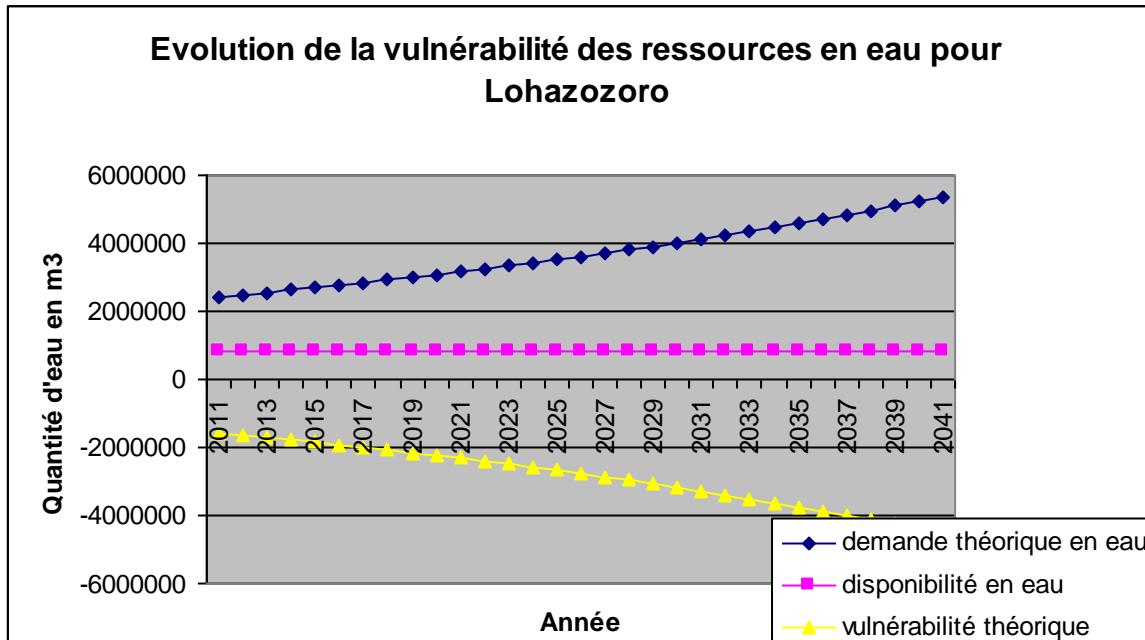
Ainsi, on a essayé une autre modélisation avec Excel pour montrer d'une manière globale l'évolution suivant la période escomptée de la demande suite à l'accroissement démographique pour arriver à la projection de la vulnérabilité des ressources en eau de ce lac suivant cet accroissement démographique. Pour cela, trois séries de simulations ont été faites.

a) Sur la base d'un taux annuel d'accroissement de la population de 2,7% et d'un nombre de population au départ de 8540 pour le Fokontany Antanety II dans lequel se trouve le lac Lohazozoro, les scénarii présentés sont les suivants:



Aussi, le nombre de la population passe de 8540 en 2011 pour arriver jusqu'à 18 992 en 2041.

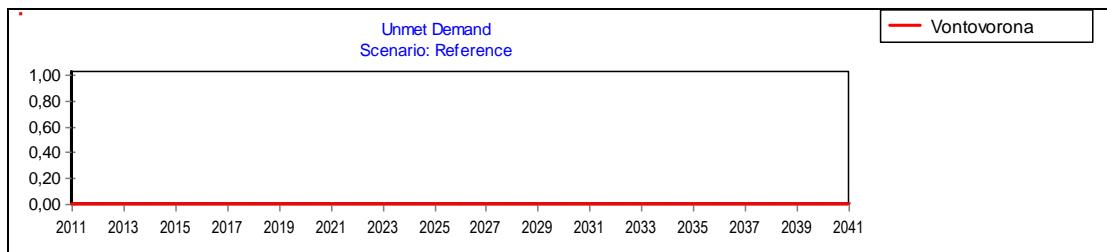
Ceci sous entend une augmentation de la demande urbaine en eau dans ce Fokontany qui va de 2 416 820 m³ en 2011 à 5 374 742 m³ en 2041 sur la base d'une consommation annuelle d'eau par habitant de 283 m³; la disponibilité en eau pris en compte étant constant et d'une valeur de 840 248 m³ ce qui a donné le graphique ci-après. (Cf. Annexe n°06, tableau n°09)



Graphique n°04 : Evolution de la vulnérabilité des ressources en eau pour Lohazozoro

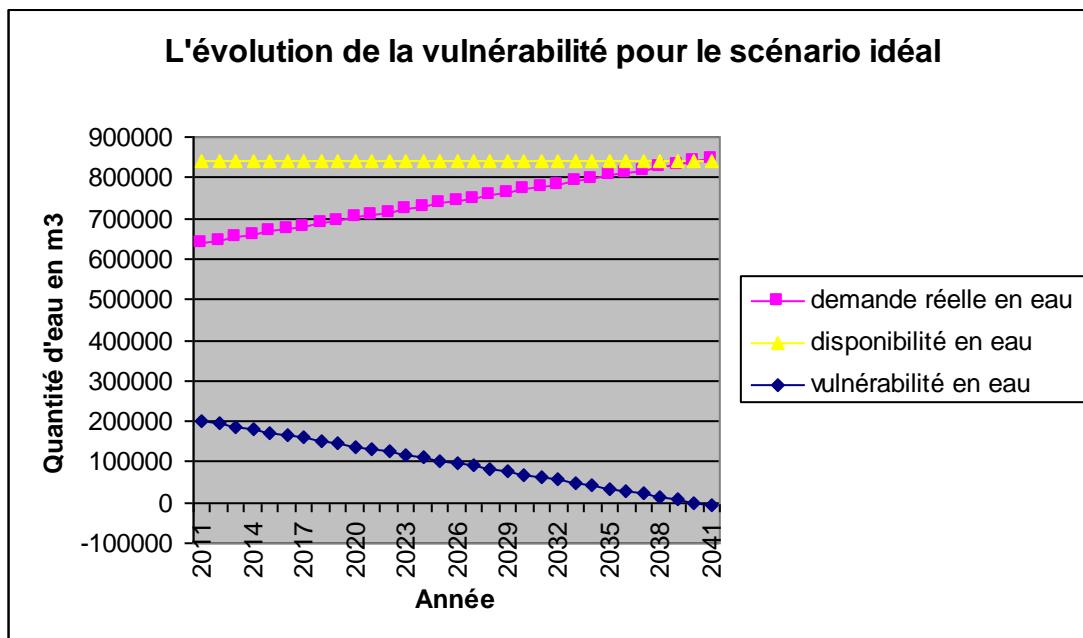
Pour la vulnérabilité théorique, ici se traduisant dans la pratique par le niveau de satisfaction de la demande en eau, la demande n'est jamais satisfaite si on alimente en eau (aprovisionnement exclusif par le lac Lohazozoro) toute la population d'Antanety II.

b) Sur la base d'un nombre de population ou plus précisément du nombre d'abonnés à la JIRAMA (sans taux d'accroissement annuel) comme étant les seuls bénéficiant de l'apport en eau de ce lac, le scénario reste constant non seulement pour l'évolution de la demande mais aussi pour le niveau de la satisfaction de la demande. WEAP a pu réalisé ce scénario , sur la base de la connexion entre source et site de demande pour la période de l'étude (2011 à 2041). Ce scénario reflète en réalité le maintien d'approvisionnement en eau et c'est en quelque sorte la quantification de la vulnérabilité en WEAP.



Elle a donné une valeur nulle pour dire que la demande des abonnés de l'usine Lohazozoro Vontovorona est satisfaite si le nombre de ces abonnés restent constants pour la période de 2011 à 2041.

c) Sur la base d'un nombre des abonnés à la JIRAMA Vontovorona de 1297 en 2011, d'une consommation réelle annuelle en eau par abonné de 492,87 m³ se basant sur la production en eau de l'usine Lohazozoro (production annuelle de l'usine égale à la consommation réelle annuelle), et d'un accroissement du nombre des abonnés de 14 par an pour assurer le maintien d'approvisionnement exclusif par le lac Lohazozoro, le scénario idéal est obtenu. (cf. Annexe n°07, tableau n°10)



Graphique n°06 : Le scénario idéal pour le maintien d'approvisionnement en eau exclusif par le lac Lohazozoro

L'évolution de la population étant de 1297 (pour l'année 2011) à 1717 (pour l'année 2041), la demande varie peu c'est-à-dire de 639 252 m³ en 2011 à 846 258 m³ en 2041. Cette demande

est toujours couverte par une disponibilité en eau annuelle de 840 248m³, sauf pour l'année 2041 où la demande dépasse la disponibilité en eau de 6000m³ environ.

En bref, si la JIRAMA opte pour l'approvisionnement exclusif par le lac Lohazozoro pour alimenter ces abonnés, elle serait contrainte de limiter l'augmentation annuelle du nombre de ces abonnés. Par contre, dans la réalité, le nombre de ces abonnés ont toujours tendance à augmenter considérable étant donné que le Fokontany d'Antanety II est actuellement en phase de transition vers l'urbanisme par la présence d'infrastructures touristiques et de complexes hôteliers. Le plus juste dans ce cas serait d'alimenter le lac Lohazozoro par la rivière Andromba au moyen d'un barrage seuil comme pour le cas avec le lac Mandroseza.

III.7.5.2. La pluviométrie annuelle

C'est la deuxième hypothèse clé à retenir dans le cadre de cette étude compte tenu du fait que la disponibilité en eau pour le lac Lohazozoro dépend entièrement de l'apport en eau de pluie. WEAP le réalise avec la « méthode de l'année hydrologique ».

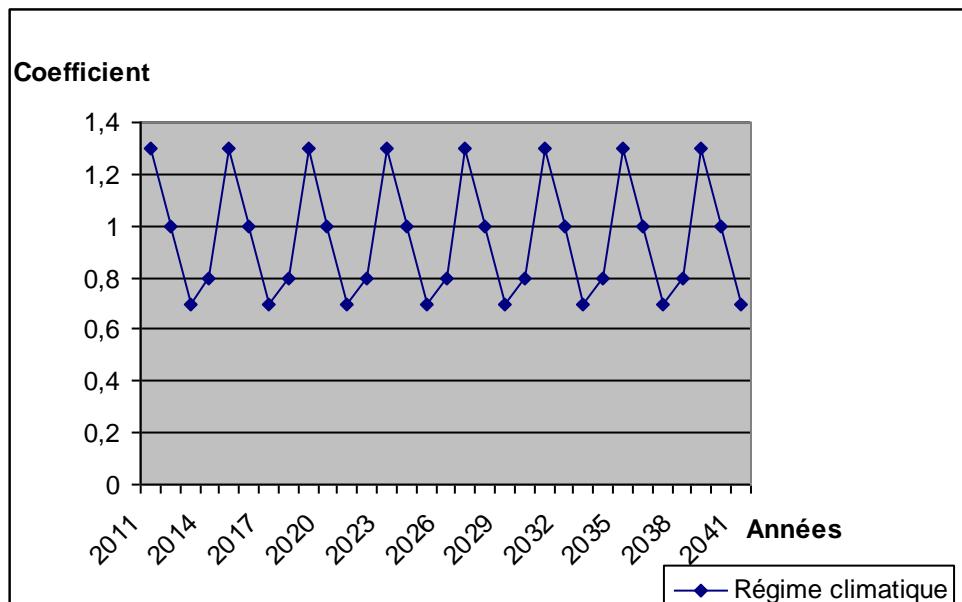
La modélisation s'effectue alors en deux étapes : la définition des régimes climatiques pour la période de 2011 à 2041 pour déterminer l'année hydrologique et la simulation de la disponibilité en eau apportée par la pluviométrie pour cette même période.

a) La définition des régimes climatiques pour la période de 2011 à 2041 a été réalisée moyennant des coefficients qui servent d'échelle de valeur proposée par WEAP afin de différencier d'une manière générale le climat annuel durant la période escomptée. Les coefficients pris en compte ont été alors les suivants pour chaque catégorie de climat :

- climat très sec : 0,7
- climat sec : 0,8
- climat normal : 1
- climat humide : 1,3
- climat très humide : 1,45

Ainsi des données sur la pluviométrie annuelle depuis 2000 jusqu'en 2009 ont été recueillies et ont été classifiées par rapport à la pluviométrie normale dans la région Analamanga qui est de 1365,3 mm par an (pluviométrie moyenne annuelle sur 30 ans c'est-à-dire de 1961 à 1990) [10]. Pour la modélisation, les années ayant une pluviométrie annuelle inférieure à la normale ont été catégorisées comme « année à climat sec ou très sec » selon l'écart ; tandis que les années ayant une pluviométrie annuelle supérieure à la normale ont été catégorisées comme

« année à climat humide ou très humide » suivant l'écart. Alors, la simulation faite pour la période du scénario (2011 – 2041) a donné le graphique suivant :



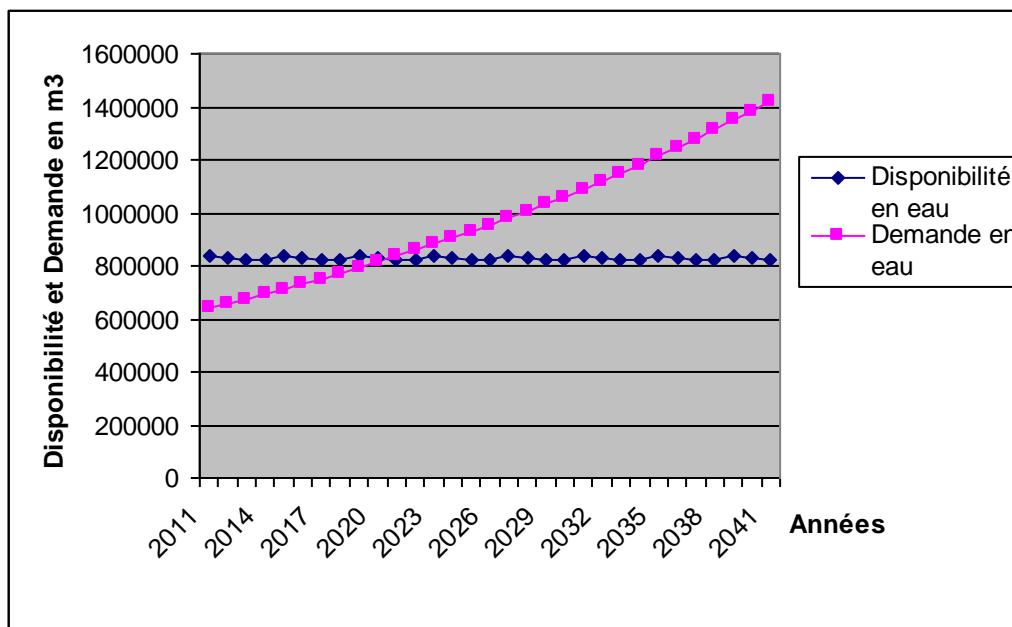
Graphique n° 07 : L'évolution des régimes climatiques de 2011 à 2041

Ici, le régime climatique humide se répète tous les quatre ans à partir de l'année 2011 ; le régime climatique normal se répète tous les quatre ans également (à partir de 2012) ainsi que le régime climatique très sec (à partir de 2013) et le régime climatique sec (à partir de 2014).

b) La simulation de la disponibilité en eau a été effectuée grâce aux coefficients pré-établis et qui ont été traduits en pourcentage pour obtenir premièrement le débit des ruisseaux en régime climatique humide, normal, sec et très sec pour aboutir deuxièmement à la quantité d'eau totale disponible par an durant la période du scénario. Pour le cas de cette modélisation, un régime climatique humide a été attribué à l'année 2011 suite au graphique présenté ci-dessus, donc le débit de ruisseaux mesuré pour cette année qui est de $4,6\text{m}^3/\text{h}$ n'est autre que le débit de ruisseaux pour toutes les années à régime climatique humide. Le débit des ruisseaux pour les autres régimes climatiques a été calculé en utilisant les coefficients émis ci-dessus, c'est-à-dire connaissant le débit en régime climatique humide de coefficient 1,3 ; on a cherché le débit attribué au régime normal avec un coefficient 1. (Cf. annexe n°08)

Par ailleurs, pour ce qui est de la demande en eau, un nombre de population égale au nombre d'abonnés à la JIRAMA mais avec un taux d'accroissement de 2,7% a été retenu pour refléter le contexte actuel de l'usage de l'eau pour le Lac Lohazozoro.

Ainsi, l'évolution de la satisfaction de la demande compte tenu de la variation climatique est représentée comme suit :



Graphique n°08 : Evolution de la satisfaction de la demande en eau suivant l'évolution du climat pour la période de 2011 à 2041

Ici, la disponibilité en eau varie légèrement et pas assez pour satisfaire une demande en eau qui augmente considérablement. Ceci étant, c'est à partir de l'année 2021 que la demande ne sera plus satisfaite pour un approvisionnement en eau à partir du Lac Lohazozoro en tenant compte du fait que ce lac est un lac fermé sans aucune jonction avec la rivière Andromba juste à côté et que les seules sources qui alimentent ce lac sont les ruisseaux venant des bassins versants aux alentours.

PARTIE 4 :

DISCUSSIONS METHODOLOGIQUES

PARTIE IV : DISCUSSIONS METHODOLOGIQUES

IV.1. LES LIMITES RENCONTREES LORS DE L'INVESTIGATION

IV.1.1. Une défaillance au niveau des informations disponibles concernant les méthodologies VSD et WEAP

Etant donné que l'étude de la vulnérabilité des ressources en eau est une idéologie nouvelle, des lacunes au niveau des informations méthodologiques ont été perçues tout au long de l'étude. Ce qui a causé des traitements incomplets ainsi que des interprétations légèrement erronée puisqu'il n'y a eu aucune étude de référence sur la vulnérabilité à l'échelle d'un lac. Ceci étant, la recherche a été faite plus ou moins par tâtonnement. Aucune étude antérieure, ni à Madagascar ni à l'étranger, n'ont été faite avec un lac pour la mesure de la vulnérabilité puisque généralement, les études sont réalisées à l'échelle d'un bassin versant tout entier. Les quelques informations méthodologiques disponibles reposaient sur des notions de base quant à la méthodologie pour le cas du VSD. Pour le WEAP, les informations ont été un peu plus avancées sur la structure du programme ainsi que sur la modélisation. Toutefois, il n'y a pas que les informations méthodologiques qui sont défaillantes mais aussi les informations nécessaires aux traitements des données telles que la pluviométrie pour l'année 2011 (de Janvier à Septembre).

IV.1.2. Une défaillance au niveau des expérimentations sur terrain

Pour l'étude de cas, la seule expérimentation réalisée pour la modélisation est celle avec la méthode WEAP. Le VSD n'a pas pu être appliqué sur le terrain pour deux raisons. Premièrement, la méthodologie VSD souffre d'une insuffisance d'informations quant à son protocole d'utilisation. On a été contraint à recueillir des études de cas réalisées dans d'autres pays. Pourtant rare sont les pays qui utilisent le VSD malgré le fait que c'est un outil complet de prévision en parfait accord avec le contexte de changement climatique. Deuxièmement, le VSD est une étude très minutieuse qui nécessite un temps relativement long puisqu'elle soulève un grand nombre de domaines et ce serait une erreur de la réaliser en ayant comme contrainte le temps. Cela risque d'avoir des répercussions graves sur le résultat.

IV.1.3. Des limites de modélisation pour l'utilisation de WEAP

Les limites rencontrées lors de la modélisation avec le logiciel WEAP sont nombreuses et surgissent à chaque étape de la méthodologie. Mais la limite la plus importante a été que le

WEAP est un logiciel sensible aux erreurs de manipulation. Il est très difficile de les corriger puisque toutes les données entrées présentent une forte corrélation. Par ailleurs, le concepteur du WEAP a déjà prescrit certaines valeurs comme le cas avec le pourcentage du débit de retour qui doit être de 100% alors qu'en réalité on n'a pas trouvé ce pourcentage. Par la suite, le scénario monté a été erroné et on n'est pas parvenu jusqu'à la fin c'est-à-dire le montage d'un scénario avec une évolution du taux d'accroissement de la population pour ensuite le connecter avec le scénario de la satisfaction de la demande.

Le scénario doit commencer à partir du mois de Janvier de l'année (premier mois de l'année) choisi comme état actuel pourtant les mesures ont été collectées en mois de Mai donc on ne pourrait pas commencer le scénario à partir du début des périodes d'étiage (mois de Mai) pour terminer avec la fin de la saison de pluie (mois d'Avril).

Aussi, bon nombre de simulations ont été faites entre autre le débit entrant pour la saison des pluies. (Cf. Annexe n°05, tableau n° 08)

Pour le cas de la méthode de l'année hydrologique, des obstacles ont été également rencontrés surtout au niveau de la défaillance d'informations concernant l'évolution annuelle du climat à Madagascar et les projections futures du climat pour les vingt prochaines années. Aussi, cette étape n'a pas été réalisée.

IV.1.4. La quantification de la vulnérabilité des ressources en eau

La vulnérabilité des ressources en eau pour le cas du lac Lohazozoro n'a pas été quantifiée comme on l'avait espéré au début si on tient compte de la définition du principe de vulnérabilité c'est-à-dire la différence entre la disponibilité en eau et le niveau de l'utilisation de l'eau. En fait, la quantification n'apparaît de cette manière avec le WEAP que sous un autre aspect qui n'est autre que le scénario de la satisfaction de la demande ou le scénario du maintien d'approvisionnement en eau.

IV.2. DISCUSSIONS METHODOLOGIQUES

IV.2.1. Méthodologies d'étude de la vulnérabilité

IV.2.1.1. Une combinaison WEAP et VSD

Le WEAP est plus recommandé dans l'étude de la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs et dans un contexte de gestion intégrée des ressources en eau. Tandis que le VSD est recommandé pour le cas d'une gestion des risques et catastrophes suite aux effets du changement climatique (sècheresse, inondation,...).

Toutefois, on peut espérer une combinaison entre WEAP et VSD. A ce moment là, le VSD fourni les inputs par une collecte des données plus avancée pour déterminer les indicateurs servant d'hypothèse clé pour WEAP dans le montage du scénario. Une modélisation directe ne peut être faite avec le VSD et donc il faut un outil de modélisation pour compléter l'étude. Toutefois, cet essai de combinaison nécessite une étude plus approfondie pour avancer un peu plus dans le concept de vulnérabilité des ressources en eau.

IV.2.1.2. Le Vulnerability spider diagram : une alternative pour un VSD simplifié

Une étude de la vulnérabilité des ressources en eau pour le cas des lacs est aussi envisageable avec l'utilisation du Vulnerability Scoping Diagram. Cette méthodologie pourrait être une alternative pour le Vulnerability Scoping Diagram simplifié. Toutefois, les indicateurs à mesurer, constituant les sommets de chaque face de la toile, doivent être prédefinis en avance pour de bons résultats.

IV.2.1.3. Calcul manuel de la vulnérabilité des ressources en eau

D'une manière plus simplifiée, on peut procéder directement à un calcul manuel de la vulnérabilité sur la base du principe de la vulnérabilité (différence entre disponibilité et usage de l'eau). Mais une projection future de cette vulnérabilité nécessite toujours une modélisation. Ainsi, on peut envisager les étapes suivantes : calcul manuel de la disponibilité totale en eau pour l'état actuel, calcul manuel de la totalité de l'usage de l'eau pour l'état actuel, calcul de la vulnérabilité pour l'état actuel pour terminer avec une modélisation. Il faut aussi bien choisir l'outil de modélisation adapté à cette méthode puisque la fonctionnalité de WEAP spécifie déjà en avance le type de données utilisées pour le montage de scénario avec le WEAP.

IV.2.2. Traitement des données pour WEAP et VSD

Pour le WEAP, des recommandations au niveau de chaque étape du traitement sont avancées. Pour la manipulation du logiciel, un apprentissage préalable du logiciel est nécessaire pour éviter toute erreur de manipulation, et il faut suivre le guide d'utilisation en anglais incorporé avec le logiciel téléchargé.

Pour la descente sur le terrain, il est plus préférable de débuter les mesures depuis le début de l'année pour ne pas avoir à simuler les données pour les autres mois.

Pour la caractérisation du site de demande urbain, un calcul manuel pour connaître le

pourcentage d'eau réellement consommée par rapport à la quantité d'eau totale du lac est nécessaire étant donné que le WEAP ne fait pas de genre de calcul.

Pour le VSD, une documentation poussée sur le protocole d'utilisation est indispensable avant de procéder à son emploi comme méthodologie d'étude de la vulnérabilité.

IV.2.3. A propos de l'étude environnementale du lac « Lohazozoro » de Vontovorona

Une étude environnementale pour le lac Lohazozoro est indispensable. Certes, la JIRAMA en a déjà réalisée mais on a pensé qu'une étude aboutissant à une projection future est requise étant donné le problème de tarissement du lac qui survient chaque année.

Par ailleurs, la protection de la ressource en eau pour le cas du lac Lohazozoro nécessite en premier lieu la mise en place d'un périmètre de protection afin d'éviter toute effraction qui nuiraient non seulement la qualité mais aussi à la quantité de la ressource disponible étant donnée que ce lac est devenu un lieu très prisé pour les activités touristiques.

Pour ce qui est du problème de tarissement du lac Lohazozoro, ce phénomène risque de se reproduire plus souvent puisque qu'en fait avec l'hypothèse du raccourcissement de la saison de pluie qui affecte la capacité du lac sous l'effet d'une évapotranspiration à la surface du lac induite par la montée de la température de l'air ambiant, un autre phénomène encore plus spectaculaire a été aperçu. Il s'agit de l'envasement possible de ce lac grâce au phénomène d'érosion très fréquent sur des bassins versants labourés (sauf pour le cas des zéro labours) étant donnée la présence les surfaces agricoles autour qui plus est se trouvent à un niveau topographique beaucoup plus élevé que celui du lac.

Aussi, des études plus approfondies quand aux origines du tarissement de ce lac en particulier doivent être faites pour pouvoir encore apporter des solutions sur le long terme puisque le climat continuera de se réchauffer d'année en année.

Toutefois, on pourrait quand même émettre quelques solutions temporaires pour alléger ce phénomène de tarissement, c'est de procéder à un dragage de ce lac pour enlever en partie les boues induites par les érosions sur les flancs des bassins versants tout autour.

CONCLUSION

CONCLUSION

Parmi les méthodologies utilisées pour étudier la vulnérabilité des ressources en eau, deux ont été retenue pour le choix d'une méthodologie plus pratique : le Water Evaluation And Planning System (WEAP) et le Vulnerability Scoping Diagram (VSD). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle le Water Evaluation And Planning system puisse être l'outil de quantification de la vulnérabilité des ressources en eau pour les lacs malgaches, a été vérifiée. Les raisons en sont : une collecte de données facile à réaliser, un champ d'intervention plus focalisé à la ressource en question (lac), un scénario ou une modélisation bien représenté, une utilisation facile puisque le logiciel est toujours accompagné de son guide d'utilisation et enfin une rentabilité économique acceptable pour les professionnels.

Pour l'étude de cas avec le lac *Lohazozoro* de Vontovorona, l'analyse a révélé qu'un approvisionnement exclusif par les ressources en eau de ce lac est risqué puisque la quantité disponible ne suffirait pas à alimenter toute la population aux alentours, aussi, un pompage direct depuis la rivière Andromba est plus que nécessaire si la JIRAMA veut étendre ses réseaux de distribution.

Par ailleurs, le WEAP présente quand même des défaillances notamment en terme d'analyse des acteurs à l'instar du Vulnerability Scoping Diagram. Il y a eu des limites qui ont restreint certaines réalisations. Aussi, des recommandations ont été avancées pour compléter cette étude sur la vulnérabilité des ressources en eau dont la plus importante serait de compléter la banque de données en réalisant une étude employant le Vulnerability Scoping Diagram pour les lacs malgaches.

Cette étude portant sur les critiques méthodologiques pour l'analyse de la vulnérabilité des ressources en eau n'est qu'une ébauche pour inciter par la suite les autres chercheurs et professionnels à développer d'autres modèles d'analyses et aussi de prendre en compte la vulnérabilité des ressources en eau dans une étude environnementale, sociale et même économique puisque la ressource en eau intègre bien toutes ces dimensions.

Ainsi, la création d'une nouvelle méthodologie encore plus pratique est sollicitée pour mieux se préparer à d'éventuels problèmes de pérennisation de l'allocation de ressources en eau face à ce changement climatique.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. BACHELET, Rémi, 2010, « *Éventail des méthodes de collecte de données* »
2. BORDET, Gaël, 2003, « *Principe de vulnérabilité* », Paris.
3. CHAPERON, Pierre, DANLOUX, Joël, FERRY, Luc, 1993, « *Fleuves et rivières de Madagascar* », ORSTOM, Paris, 874 pages
4. Dictionnaire LAROUSSE, 2008
5. Dictionnaire Robert in BORDET, Gaël, 2003, « *Principe de vulnérabilité* », Paris
6. FAO, 1997, « *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* » n°52, in BORDET, Gaël, 2003, Principe de vulnérabilité, Paris
7. GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001, « *Annexe B : glossaire* », En ligne à l'adresse <http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf> (accès en janvier 2008) in ACCMA
8. HAHN, Micah B., RIEDERER, Anne M., FOSTER, Stanley O., 2009, “*The Livelihood Vulnerability Index: A pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change—A case study in Mozambique*”, Global Environmental Change, Elsevier, East Anglia University, 15 pages
9. Inforessources, « *Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) : La voie du développement durable* », focus n° 1/03, 16 pages
10. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE ET DE LA PECHE, Unité de Politique de Développement Rural (UPDR), 2003, « *Monographie de la région d'Antananarivo* », 139 pages
11. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES FORETS, « *Politique Nationale de Lutte contre le Changement Climatique* », Antananarivo, 10 pages
12. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES EAUX ET FORETS, 2008, « *Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar* », extrait Chapitre II, Antananarivo
13. *Monographie du Fokontany Antanety II, Vontovorona*, 2008
14. POLSKY, Colin, NEFF, Rob, YARNAL, Brent, 2007, “*Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram*”, Global Environmental Change, Elsevier, East Anglia University, 15 pages
15. Projet Plan d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques (PANA), 2007, « *Etude de la vulnérabilité, identification des principales mesures d'adaptation et des options prioritaires de riposte aux changements climatiques : secteur des*

ressources en eau », Ministère de l'environnement et des ressources forestière, PNUD, FEM, Togo, 45 pages

16. RAKOTONDRAIBE, F., 2007, « *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)* », Mémoire de recherche en DEA, Département Hydrogéologie, Ecole Supérieure Polytechniques d'Antananarivo, 113 pages
17. ROUDIER, Philippe, 2008, « *Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique : approche par indicateurs* », Mémoire de fin d'étude Master 2, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 94 pages
18. Service d'Eude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA), 2007, « *Méthode de hiérarchisation de la vulnérabilité de la ressource en eau* », Note d'information, France, 12 pages
19. Stockholm Environment Institute (SEI), 2008, « *WEAP Système d'évaluation et de planification des ressources en eau : Tutorial Une collection de modules autonomes pour aider à apprendre le logiciel WEAP* », SEI, 203 pages
20. UNDP GoAL WaSH Programme, 2009, « *Evaluation sectorielle de pays : volume 1, Madagascar* », PNUD, USA, 20 pages

ANNEXES

ANNEXE

Annexe n°1 :

Fiche d'enquête sanitaire utilisée par la JIRAMA servant de matrice pour la collecte des données (Source JIRAMA DEXO)

JIRAMA DIRECTION EXPLOITATION EAU DEPARTEMENT QUALITE EAU SERVICE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT DES RESSOURCES EN EAU ET DES RESEAUX DE DISTRIBUTION	<i>FICHE D'ENQUETE SANITAIRE</i>	Version 1 : 30/07/04 Révisée le : 31/05/06 Rédigée par 97668 Validée par DQO Annexe MP/SPERORD:001-2 Page 1/5
---	---	---

DIR :

SOUS

GROUPEMENT :

SECTEUR :

CODE SIGLE

Renseignements sur le centre :

- Population habitants
- Production journalière m³/j
- Nombre de borne fontaine
- Nombre d'abonnés
- Réseau d'assainissement

* Année de mise en service
* Etat du réseau Taux de couverture
* Observations

I. ENQUETE SANITAIRE SUR LES RESSOURCES EN EAU

1. Ressource en eau exploitée SURFACE SOUTERRAINE

- *Type de captage* FORAGE PUIT SOURCE AUTRES

BARRAGE ESTACADE PRISE SUR BERGE AUTRES

- *Mode d'adduction* POMPAGE GRAVITAIRE AUTRES

2. Le lieu d'implantation : Distance par rapport au bureau :
rivière :

3. Les données relatives de l'ouvrage :

Conditions initiales

Année de mise en service

Profondeur	<input type="text"/>	Diamètre	<input type="text"/>												
Niveau Statique (NS)	<input type="text"/>	Hauteur d'eau	<input type="text"/>												
Niveau Dynamique (ND)	<input type="text"/>	Débit d'essai	<input type="text"/> m ³ /h												
Largeur barrage	<input type="text"/>	Largeur deversoir	<input type="text"/>												
<u>Conditions d'exploitation</u>															
Niveau Statique (NS)	<input type="text"/>	Hauteur d'eau	<input type="text"/>												
Niveau Dynamique (ND)	<input type="text"/>	Débit	<input type="text"/> m ³ /h												
Hauteur d'eau par rapport au fond de la crepine	<input type="text"/>														
Hauteur de la crepine	<input type="text"/>														
<u>Dernière intervention de maintenance</u>															
- Date															
- Action															
- Intervenants															
- Résultat															
- Observation															
4. La géologie du terrain	<ul style="list-style-type: none"> - Nature du terrain : - Recouvrement : - Coupe lithologique 														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Côte (m)</th> <th>Lithologie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>De à</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Côte (m)	Lithologie	De à									
Côte (m)	Lithologie														
De à															
De à															
De à															
De à															
De à															

<p>JIRAMA DIRECTION EXPLOITATION EAU DEPARTEMENT QUALITE EAU SERVICE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT DES RESSOURCES EN EAU ET DES RESEAUX DE DISTRIBUTION</p>	<p><i>FICHE D'ENQUETE SANITAIRE</i></p>	<p>Version 1 : 30/07/04 Révisée le : 31/05/06 Rédigée par 97668 Validée par DQO Annexe MP/SPERORD:001-2 Page 2/5</p>
--	---	--

5. Hydrogéologie de la nappe

Type nappe : Libre Captive Artésienne

6. La qualité de l'eau

- initiale
 - exploitation
 - cas de pollution constatée:

Origine : _____

- ### - Observation

7. Historique climatique

8. Situation juridique du terrain

- Niveau JIRAMA
 - Privé
 - Historique
 - Procédures en cours
 - Observations

9. Autres ressources en eau

- Exploitée
- Dégagée
- Non dégagée
- Existence d'autres points d'eau
- Distance et direction par rapport au captage objet de l'enquête

10. Etat de lieu au niveau du captage

- | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|--------------------------|-------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| - Clôture | oui | <input type="checkbox"/> | non | <input type="checkbox"/> | | |
| • Nature | | • Etat | | | | |
| - Activité au sein de la clôture | | | | | | |
| - Présence de gardien | oui | <input type="checkbox"/> | non | <input type="checkbox"/> | | |
| - Existence de moyen de communication | BLU | <input type="checkbox"/> | radio | <input type="checkbox"/> | telephone | <input type="checkbox"/> |
| - Autres informations | | | | | | |

11. Données sur l'environnement

- Piste d'accès

* Etat : Mauvais Moyen Bon

* Observation

- Situation du bassin versant

- Evenement

- Feu brousse

- Autres

- Observation

Annexe n°02 :

Tableau n°05: Débit entrant Lac Lohazozoro pour l'état actuel (année 2011 ; unité en m³)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Lac Lohazozoro	804472	804472	804472	804472	802236	802236	802236	802236	802236	802236	804472	804472

Source : Traitement WEAP

Annexe n°03 :

Tableau n°06 : Pourcentage de la consommation mensuelle réelle en eau par rapport à la disponibilité totale pour l'année 2011 (en %)

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Vontovorona	7,07	6,21	6,7	6,39	6,5	6,55	6,77	6,77	6,55	6,77	6,53	6,75

Source : Traitement WEAP

Annexe n°04 :

Tableau n°07 : Débit de retour mensuel pour l'année 2011 (en %)

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Vers lac Lohazozoro	93	93,79	93,3	93,61	93,5	93,5	93,23	93,23	93,5	93,23	93,5	93,23

Source : Traitement WEAP

Annexe n°05 :

Tableau n° 08: Les limites pour le traitement avec WEAP

ETAPES DU TRAITEMENT WEAP	LIMITES RENCONTREES
1. <u>Guide d'utilisation du WEAP</u>	Le tutorial n'est pas à jour pour ce qui est en version française. On a utilisé la nouvelle version WEAP 3.0 comme logiciel pourtant le tutorial mis à notre disposition est celui de la version WEAP 2.1. La version que nous avons utilisée est strictement en Anglais et rejette les autres langues de travail.
2. <u>Années et pas de temps :</u> définition de l'état actuel	Pour l'année 2011, impossible de débuter le scénario en Mai 2011 (début de mesure de débit) mais en Janvier 2011.
3. <u>Caractérisation de la source :</u> localisation géographique sur la carte, donnée sur le débit entrant mensuel dans le lac (débit entrant = capacité du lac + débit des autres sources alimentant le lac + pluviométrie)	Pas de mesure directe de débit de Janvier 2011 à Avril 2011 puis d'Octobre à Décembre d'où simulation de valeur puisqu'il est impossible de mettre une valeur nulle pour un lac qui a déjà un volume de rétention d'eau. Pas de données disponibles pour la pluviométrie 2011 Débit des autres sources prises en compte a été

	le double du débit en période d'étiage (simulation) Difficile de changer les échelles pour les graphes Pas de données sur l'évapotranspiration
4. <u>Création d'un site de demande urbain</u> Emplacement du site sur la carte Priorisation de l'allocation des ressources Niveau d'activité annuel (nombre de population) Consommation réelle	Nécessité d'un calcul manuel pour connaître le pourcentage d'eau réellement consommée par rapport à la quantité d'eau totale du lac. Valeur prise sur terrain limitée à la consommation réelle de Janvier à Mai 2011, donc prise en compte de valeur moyenne pour les autres mois de l'année 2011 Quantité consommée limitée aux abonnés de la JIRAMA Vontovorona uniquement pour la consommation réelle.
5. <u>Création d'un site de demande agricole</u>	Non effectué pour le cas de Lohazozoro puisque les populations riveraines n'utilisent pas le lac théoriquement à des fins agricoles
6. <u>Liaison entre site de demande et source</u>	Sur la carte de localisation de la zone d'étude, les flèches (du lac Lohazozoro vers Vontovorona et de Vontovorona vers le lac Lohazozoro) se superposent étant donné la distance séparant ces deux points (trop proche).
7. <u>Création des outils de base pour le scénario</u> Hypothèse clé	Langage de WEAP difficile à cerner surtout pour les paramètres numériques à entrer. cette étape n'a pas pu être réalisée.
8. <u>Elaboration du scénario proprement dit :</u> <ul style="list-style-type: none">- Changer l'horizon temporel du projet sans changer l'état actuel (2011)- Créer une hypothèse clé supplémentaire (taux d'accroissement)- Spécifier la croissance de la population- Exécuter le scénario référence (demande non satisfaite)	Difficile à manipuler, on n'a pas pu entrer la valeur du taux d'accroissement de la population Scénario de la demande non satisfaite en rapport avec la croissance démographique a donné une valeur nulle pour la période de 2012 à 2041 par erreur lors de l'entrée des données
9. <u>Appréciation du résultat</u>	On n'est pas parvenu jusqu'à l'obtention de scénario en rapport avec la croissance démographique avec le logiciel WEAP.

Annexe n°6 :

Vulnérabilité par rapport au nombre de population 8540, avec une croissance démographique de 2,7%, et une consommation annuelle en eau par habitant de 283 m³

Tableau n°09 : Traitement Excel des données pour la modélisation de la demande en rapport avec le taux d'accroissement de la population

Années	Nombre de population	Demande théorique en eau par habitant (m ³)	Capacité du lac (m ³)	Apport des ruisseaux (m ³)	Disponibilité totale (m ³)	Vulnérabilité théorique (m ³)
2011	8 540	2 416 820	800 000	40 248	840 248	-1 576 572
2012	8 770	2 482 074,14	800 000	40 248	840 248	-1 641 826,14
2013	9 007	2 549 090,14	800 000	40 248	840 248	-1 708 842,14
2014	9 250	2 617 915,58	800 000	40 248	840 248	-1 777 667,58
2015	9 500	2 688 599,3	800 000	40 248	840 248	-1 848 351,3
2016	9 757	2 761 191,48	800 000	40 248	840 248	-1 920 943,48
2017	10 020	2 835 743,65	800 000	40 248	840 248	-1 995 495,65
2018	10 291	2 912 308,73	800 000	40 248	840 248	-2 072 060,73
2019	10 569	2 990 941,06	800 000	40 248	840 248	-2 150 693,06
2020	10 854	3 071 696,47	800 000	40 248	840 248	-2 231 448,47
2021	11 147	3 154 632,27	800 000	40 248	840 248	-2 314 384,27
2022	11 448	3 239 807,35	800 000	40 248	840 248	-2 399 559,35
2023	11 757	3 327 282,14	800 000	40 248	840 248	-2 487 034,14
2024	12 075	3 417 118,76	800 000	40 248	840 248	-2 576 870,76
2025	12 401	3 509 380,97	800 000	40 248	840 248	-2 669 132,97
2026	12 735	3 604 134,25	800 000	40 248	840 248	-2 763 886,25
2027	13 079	3 701 445,88	800 000	40 248	840 248	-2 861 197,88
2028	13 432	3 801 384,92	800 000	40 248	840 248	-2 961 136,92
2029	13 795	3 904 022,31	800 000	40 248	840 248	-3 063 774,31
2030	14 168	4 009 430,91	800 000	40 248	840 248	-3 169 182,91
2031	14 550	4 117 685,55	800 000	40 248	840 248	-3 277 437,55
2032	14 943	4 228 863,06	800 000	40 248	840 248	-3 388 615,06
2033	15 346	4 343 042,36	800 000	40 248	840 248	-3 502 794,36
2034	15 761	4 460 304,5	800 000	40 248	840 248	-3 620 056,5
2035	16 186	4 580 732,73	800 000	40 248	840 248	-3 740 484,73
2036	16 623	4 704 412,51	800 000	40 248	840 248	-3 864 164,51
2037	17 072	4 831 431,64	800 000	40 248	840 248	-3 991 183,65
2038	17 533	4 961 880,3	800 000	40 248	840 248	-4 121 632,3
2039	18 006	5 095 851,07	800 000	40 248	840 248	-4 255 603,07
2040	18 493	5 233 439,04	800 000	40 248	840 248	-4 393 191,05
2041	18 992	5 374 741,9	800 000	40 248	840 248	-4 534 493,9

Annexe n°07 :

Scénario idéal : nombre de population = nombre d'abonné, augmentation de 14 abonnés chaque année, consommation réelle annuelle par abonné de 492,87m³ (sur la base de la production de l'usine Lohazozoro)

Tableau n°10 : Scénario idéal pour un maintien d'approvisionnement en eau de 2011 à 2041

Années	Nombre d'abonnés	Demande théorique en eau par habitant (m ³)	Capacité du lac (m ³)	Apport des ruisseaux (m ³)	Disponibilité totale (m ³)	Vulnérabilité théorique (m ³)
2011	1 297	639 252,39	800 000	40 248	840 248	200 995,61
2012	1 311	646 152,57	800 000	40 248	840 248	194 095,43
2013	1 325	653 052,75	800 000	40 248	840 248	187 195,25
2014	1 339	659 952,93	800 000	40 248	840 248	180 295,07
2015	1 353	666 853,11	800 000	40 248	840 248	173 394,89
2016	1 367	673 753,29	800 000	40 248	840 248	166 494,71
2017	1 381	680 653,47	800 000	40 248	840 248	159 594,53
2018	1 395	687 553,65	800 000	40 248	840 248	152 694,35
2019	1 409	694 453,83	800 000	40 248	840 248	145 794,17
2020	1 423	701 354,01	800 000	40 248	840 248	138 893,99
2021	1 437	708 254,19	800 000	40 248	840 248	131 993,81
2022	1 451	715 154,37	800 000	40 248	840 248	125 093,63
2023	1 465	722 054,55	800 000	40 248	840 248	118 193,45
2024	1 479	728 954,73	800 000	40 248	840 248	111 293,27
2025	1 493	735 854,91	800 000	40 248	840 248	104 393,09
2026	1 507	742 755,09	800 000	40 248	840 248	97 492,91
2027	1 521	749 655,27	800 000	40 248	840 248	90 592,73
2028	1 535	756 555,45	800 000	40 248	840 248	83 692,55
2029	1 549	763 455,63	800 000	40 248	840 248	76 792,37
2030	1 563	770 355,81	800 000	40 248	840 248	69 892,19
2031	1 577	777 255,99	800 000	40 248	840 248	62 992,01
2032	1 591	784 156,17	800 000	40 248	840 248	56 091,83
2033	1 605	791 056,35	800 000	40 248	840 248	49 191,65
2034	1 619	797 956,53	800 000	40 248	840 248	42 291,47
2035	1 633	804 856,71	800 000	40 248	840 248	35 391,29
2036	1 647	811 756,89	800 000	40 248	840 248	28 491,11
2037	1 661	818 657,07	800 000	40 248	840 248	21 590,93
2038	1 675	825 557,25	800 000	40 248	840 248	14 690,75
2039	1 689	832 457,43	800 000	40 248	840 248	7 790,57
2040	1 703	839 357,61	800 000	40 248	840 248	890,39
2041	1 717	846 257,79	800 000	40 248	840 248	-6 009,79

Annexe n°08 :

Evolution de la satisfaction de la demande en eau en rapport avec la variation climatique

Tableau n°11 : Evolution de la disponibilité en eau par rapport à l'évolution du climat

Année	Régime climatique	coeff/régime	Apport en eau des ruisseaux (m ³)	Disponibilité totale en eau (m ³)
2011	Humide	1,3	40 248	840 248
2012	Normal	1	30 960	830 960
2013	Très sec	0,7	21 672	821 672
2014	Sec	0,8	24 768	824 768
2015	Humide	1,3	40 248	840 248
2016	Normal	1	30 960	830 960
2017	Très sec	0,7	21 672	821 672
2018	Sec	0,8	24 768	824 768
2019	Humide	1,3	40 248	840 248
2020	Normal	1	30 960	830 960
2021	Très sec	0,7	21 672	821 672
2022	Sec	0,8	24 768	824 768
2023	Humide	1,3	40 248	840 248
2024	Normal	1	30 960	830 960
2025	Très sec	0,7	21 672	821 672
2026	Sec	0,8	24 768	824 768
2027	Humide	1,3	40 248	840 248
2028	Normal	1	30 960	830 960
2029	Très sec	0,7	21 672	821 672
2030	Sec	0,8	24 768	824 768
2031	Humide	1,3	40 248	840 248
2032	Normal	1	30 960	830 960
2033	Très sec	0,7	21 672	821 672
2034	Sec	0,8	24 768	824 768
2035	Humide	1,3	40 248	840 248
2036	Normal	1	30 960	830 960
2037	Très sec	0,7	21 672	821 672
2038	Sec	0,8	24 768	824 768
2039	Humide	1,3	40 248	840 248
2040	Normal	1	30 960	830 960
2041	Très sec	0,7	21 672	821 672

Tableau n°12 : Evolution de la demande en eau en rapport avec l'évolution de la disponibilité en eau

Année	Nombre d'abonnés	Consommation par abonné (m ³ /an)	Demande totale en eau (m ³)	Vulnérabilité (m ³)
2011	1297	492,8	639 161,6	201 086,4
2012	1332	492,8	656 418,9	174 541
2013	1368	492,8	674 142,3	147 529,7
2014	1405	492,8	692 344,1	132 423,9

2015	1443	492,8	711 037,4	129 210,6
2016	1482	492,8	730 235,4	100 724,6
2017	1522	492,8	749 951,8	71 720,2
2018	1563	492,8	770 200,5	54 567,5
2019	1605	492,8	790 995,9	49 252,1
2020	1648	492,8	812 352,8	18 607,2
2021	1693	492,8	834 286,3	-12 614,3
2022	1739	492,8	856 812	-32 044
2023	1786	492,8	879 945,9	-39 697,9
2024	1834	492,8	903 704,5	-72 744,5
2025	1883	492,8	928 104,5	-106 432,5
2026	1934	492,8	953 163,3	-128 395,3
2027	1986	492,8	978 898,7	-138 650,7
2028	2040	492,8	1 005 329	-174 369
2029	2095	492,8	1 032 472,9	-210 800,9
2030	2152	492,8	1 060 349,7	-235 581,7
2031	2210	492,8	1 088 979,1	-248 731,1
2032	2269	492,8	1 118 381,5	-287 421,5
2033	2331	492,8	1 148 577,9	-326 905,8
2034	2394	492,8	1 179 589,4	-354 821,4
2035	2458	492,8	1 211 438,4	-371 190,7
2036	2525	492,8	1 244 147,2	-413 187,2
2037	2593	492,8	1 277 739,2	-456 067,8
2038	2663	492,8	1 312 238,1	-487 470,1
2039	2735	492,8	1 347 668,5	-507 420,5
2040	2808	492,8	1 384 055,6	-553 095,6
2041	2884	492,8	1 421 425,1	-599 753,1

