



Intitulé du mandat :

« Assurer l'évaluation des risques et des vulnérabilités du secteur "eau dans la partie Sud (Androy, Anôsy et Atsimo Andrefana), et identifier des mesures de riposte, dans la cadre du projet « Planification de l'adaptation (à moyen terme) dans les secteurs sensibles au climat à Madagascar »

Rapport final

Percy Yvon Rakoto
Jina Ratsimba Rabearisoa
Juin 2021

Table des matières

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES CARTES	II
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES PHOTOS.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES ANNEXES	V
LISTE DES ABREVIATIONS.....	I
RESUME EXECUTIF.....	I
I- INTRODUCTION	1
1 CADRAGE HISTORIQUE ET INSTITUTIONNEL DE L'ÉTUDE.....	3
2 CONTEXTES GEOGRAPHIQUES ET CLIMATIQUES	4
2. 1. <i>Descriptions sociales et économiques de la zone d'étude</i>	4
2. 1. 1. Région Androy.....	6
2. 1. 2. Région Anosy.....	6
2. 1. 3. Région Atsimo Andrefana	6
2. 2. <i>Variation du climat</i>	7
2. 2. 1. Au niveau national	7
2. 2. 2. Au niveau des trois régions.....	7
2. 3. <i>Projections scientifiques du climat : scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5</i>	8
2. 3. 1. Au niveau national	8
2. 3. 2. Au niveau des trois régions.....	11
2. 4. <i>Situations en eaux souterraines</i>	12
2. 4. 1. Ressources en eaux souterraines existantes	12
2. 4. 2. Profondeur estimée de la surface piézométrique	14
2. 4. 3. Qualité de la nappe	15
II- VULNERABILITES DU SECTEUR « EAU » DANS LA PARTIE SUD	16
4 APPROCHE ET METHODOLOGIE.....	16
4. 1. <i>Collecte de données socio-économiques pour l'évaluation de la vulnérabilité : Approche AR5 du GIEC</i>	16
4. 1. 1. Consultation des acteurs et collecte de données.....	17
4. 1. 2. Analyse de la vulnérabilité	21
4. 2. <i>Exposition : Analyse de l'offre en ressources en eaux par rapport au besoin</i>	21
4. 2. 1. Analyse de l'offre : modélisation hydrologique.....	22
4. 2. 2. Analyse des besoins en eau	30
4. 3. <i>Sensibilité : taux d'accès à l'eau potable</i>	31
4. 4. <i>Capacité d'adaptation : situations hydrogéologiques (eaux souterraines)</i>	31
4. 5. <i>Calcul de la vulnérabilité en eau des zones d'intervention</i>	32
III- RESULTATS	33
7 IMPACTS SENTIS LOCALEMENT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	33
7. 1. <i>Disponibilité et accès à l'eau</i>	33
7. 2. <i>Pratiques agricoles, d'élevage et de pêche</i>	34
7. 3. <i>Impacts socio-économiques et sur la santé</i>	36
7. 4. <i>Exposition et impact du changement climatique selon le cadre intégré de classification de la sécurité alimentaire</i>	36
8 ANALYSE DE LA VULNERABILITE.....	38

8. 1. Exposition.....	38
8. 1. 1. Description des paramètres climatiques	38
8. 1. 2. Description des paramètres biotiques : cartographie d'occupation du sol 2020 39	
8. 1. 3. Besoins en eau	39
8. 1. 4. Offre en ressources en eaux de surface	40
8. 1. 5. Tendances et saisonnalité du climat dans les 3 Régions du Sud.....	55
8. 1. 6. Notation de l'exposition	56
8. 2. Sensibilité (Taux d'accès à l'eau potable)	57
8. 3. Capacité d'adaptation (Eaux souterraines)	58
8. 4. Vulnérabilité en ressources en eau de la population des 3 Régions	59
9 IDENTIFICATION DES ALTERNATIVES D'ADAPTATION POUR LE SECTEUR « EAU » ET ESTIMATION DES COUTS DE LEUR MISE EN ŒUVRE	62
9. 1. Niveau national.....	62
9. 1. 1. Plan National d'Adaptation au changement climatique (PNA) et Objectif du Développement Durable (ODD 6).....	62
9. 1. 2. Politique nationale en eau et la situation en eau dans les 3 Régions du Sud de Madagascar.....	64
9. 1. 3. Formation continue pour les acteurs locaux par le MEAH et les DREAH	66
9. 1. 4. Information, Education, Communication (IEC)	66
9. 2. Niveau inter-régional	66
9. 2. 1. Programmes et structures existants	67
9. 2. 2. Programmes et projets proposés	70
9. 3. Niveau régional	77
9. 3. 1. Région Atsimo Andrefana	77
9. 3. 2. Région Anosy.....	79
9. 3. 3. Région Androy.....	80
IV- LIMITES ET CONTRAINTES DE L'ETUDE	82
4. 1. Lenteurs administratives pour la collecte des données climatiques.....	82
4. 2. Indisponibilité des données climatiques en fréquence journalière et des données hydrologiques.....	82
4. 3. Données non mises à jour sur les fleuves et les cours d'eau de Madagascar.....	83
V- RECOMMANDATIONS.....	83
VI- MESSAGES-CLES POUR LES DECIDEURS	84
VII- CONCLUSION.....	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	86
ANNEXES.....	I

Liste des cartes

Carte 1 : Zones hydrologiques dans le Sud.....	12
Carte 2 : Différents types de nappes dans le Sud de Madagascar.....	14
Carte 3 : Profondeur estimée de la nappe	14
Carte 4 : Qualité d'eau de la nappe	15
Carte 5: Carte géologique du Sud de Madagascar	20
Carte 6 : Localisation des communes échantillonnées	20
Carte 7: Principaux Bassins Versants et fleuves de la zone d'étude.....	23

Carte 8: Scènes Landsat qui couvrent la zone d'étude	24
Carte 9 : Localisation des stations météorologiques.....	26
Carte 10 : Écart annuel des précipitations pour deux horizons temporels 2030 et 2050	27
Carte 11 : Écart de températures maximales et minimales annuelles pour les horizons à deux temps 2030 et 2050	28
Carte 12 : Localisation des stations hydrologiques.....	29
Carte 13 : Carte d'occupation du sol (2020) des trois régions.....	39
Carte 14. Répartition spatiale de la disponibilité en eau de ruissèlement par bassin versant, moyenne annuelle	54
Carte 15. Indice de sensibilité à l'eau au niveau des trois régions	57
Carte 16 : Indice de capacité d'adaptation par district.....	58
Carte 17 : Projection de la vulnérabilité en ressource en eau	60

Liste des figures

Figure 1. Histogramme de la population dans les 3 régions	5
Figure 2. Cycle saisonnier - Utilisation de GCM	10
Figure 3. Température moyenne – Utilisation de GCM	10
Figure 4. Précipitation moyenne - Utilisation de GCM.....	11
Figure 5. Extraction des scénarii climatiques au niveau Régional à Madagascar	11
Figure 6. Cadre conceptuel d'analyse des risques	16
Figure 7. Approche globale d'analyse du risque climatique.....	17
Figure 8 : Historique des précipitations et des températures moyennes dans les 3 régions	38
Figure 9 : Différence de précipitations mensuelles de scenarii par rapport à la moyenne observée	38
Figure 10. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Linta, 1990-2018.....	40
Figure 11. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Linta	41
Figure 12. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Linta.....	42
Figure 13. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Onilahy, 1990-2018	43
Figure 14. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Onilahy.....	43
Figure 15. Graphe comparatif des besoins et des ressources disponibles, BV Onilahy	44
Figure 16. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Fiherenana, 1990-2018 ..	45
Figure 17. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Fiherenana....	45
Figure 18. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Fiherenana.....	46
Figure 19. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Mandrare, 1990-2018.....	47
Figure 20. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Mandrare	47
Figure 21. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Mandrare.....	48
Figure 22 Volume d'eau de ruissèlement mensuel, BV Manambovo, 1990-2018	49
Figure 23. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Manambovo .	49
Figure 24. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Manambovo	50
Figure 25. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Menarandra, 1990-2018.	51
Figure 26. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Menarandra ..	52
Figure 27. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Menarandra	52

Liste des photos

Photo 1. Entretien avec le DREAH Atsimo Andrefana	19
Photo 2 : Réunion communautaire dans la Commune Itampolo	21
Photo 3. Bassin versant de l'Onilahy	23
Photo 4 : Puits construites le long de la RN10 vers Ambandro	34
Photo 5 : Charrettes transportant de l'eau vers Sampoina	34
Photo 6 : Multi-usage des ressources en eau disponibles	35
Photo 7 : Terrain anciennement agricole devenu du sable puis provoquant le « Tio-mena »	39
Photo 8: Station météorologique à Sampoina	67
Photo 9 : Station météorologique de l'IFVM à Ambovombe	69

Liste des tableaux

Tableau 1. Variations de précipitations selon les régions	7
Tableau 3. Notation de l'exposition	22
Tableau 4 : Description des scènes d'images Landsat utilisées	25
Tableau 6 : Liste des localités de stations hydrologiques	29
Tableau 7. Notation de la sensibilité	31
Tableau 8 : Note donnée aux différentes qualités de la nappe et des profondeurs d'ouvrage	32
Tableau 9 : Profondeur de l'eau au niveau des Communes échantillonnées	33
Tableau 10 : Besoins en eau par district (Millier de m ³)	40
Tableau 11. Récapitulatif des taux de réponse des besoins par rapport à l'offre	55
Tableau 12 Tableau récapitulatif des notations de l'exposition des Districts	56
Tableau 13. Score de la sensibilité	57
Tableau 14. Score de la capacité d'adaptation	58
Tableau 15. Note de vulnérabilité en ressources en eau dans les 3 Régions	59
Tableau 16. Proposition de gestion des entretiens et maintenance	72
Tableau 17. Coût de la mise en place du projet d'approvisionnement en eau potable et irrigation par barrage hydro-électrique sur la rivière Efaho	73
Tableau 18. Coût d'installation d'un système de forage	74
Tableau 19. Coût estimatif du suivi de la nappe phréatique dans les 3 Régions	74
Tableau 20. Récapitulatif des coûts du BPOR dans les Régions Anosy, Androy et Atsimo Andrefana par Agence de Bassin	75
Tableau 21. Coût indicatif de la mise en place d'un système de stockage et de réutilisation dans un réservoir aquifère	78
Tableau 22. Coût de réalisation du système de stockage des eaux de ruissèlement	80
Tableau 23. Coût de réalisation du système d'approvisionnement en eau potable et irrigation dans la Commune d'Ambohimalaza	81
Tableau 24. Liste des paramètres et les coefficients	XVII

Liste des annexes

Annexe 1 : Description des Bassins Versants.....	I
Annexe 2. Stockage de la dépression.....	II
Annexe 3. Caractéristiques du sol.....	II
Annexe 4 :. Coefficient de rugosité de Manning pour la couverture du sol	II
Annexe 5 : Coefficient de rugosité de Manning pour les cours d'eau naturels.....	III
Annexe 6 : Besoins en eau pastorale (Eau en Millier de m ³).....	IV
Annexe 7 : Besoins en eau agricole (Eau en Millier de m ³).....	V
Annexe 8: Besoins en eau de la population (Millier de m ³)	VI
Annexe 9 : Note de vulnérabilité par type de nappes présentes dans les trois régions.....	VII
Annexe 10 : États de connaissance sur le changement climatique au niveau national et dans le Sud	VIII
Annexe 11 : Présentation du logiciel PCSWMM	XIV
Annexe 12 : Traitements d'images satellitaires et descriptions des classes d'occupations du sol.....	XVI
Annexe 13. Historique des grands projets liés à l'amélioration des services sur l'eau et sur le changement climatique dans le Sud.....	XVIII

Liste des abréviations

- AB** : Agence de Bassin
ACF : Action Contre la Faim
AEP : Adduction d'Eau Potable
AES : Alimentation en Eau dans le Sud de Madagascar
AFAFI-SUD : Appui au Financement de l'Agriculture et aux Filières Inclusives dans le Sud et le Sud Est de Madagascar
AND : Autorité Nationale Désignée
ANDEA : Autorité Nationale De l'Eau et de l'Assainissement
APAA : Approche Paysage dans la Région Atsimo Andrefana
AR5 : 5th Assessment Report
ASR : Aquifer Storage and Recovery
BNCCREDD+ : Bureau National de Coordination des Changements Climatiques et la Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts
BNGRC : Bureau National de la Gestion des Risques et Catastrophes
BPOR : Budget Programme Objectifs Régionaux
BV : Bassin versant
CC : Changement climatique
CDD : Conseil Diocésain de Développement
CDN : Contributions Déterminées Nationales
CEPE : Certificat d'Études Primaires Élémentaires
CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 ou projet d'intercomparaison des modèles couplés
CMM : Modèles Climatiques Mondiaux
CNA : Centre National Antiacridien
COP25 : Conférence des Parties, session 25
CPGU : Cellule de Prévention et Gestion des Urgences
CREAM : Centre de Recherches, d'Études et d'Appui à l'Analyse Économique de Madagascar
CTAS : Centre technique agro-écologique du Sud
CTC-N : Climate Technology Centre and Network
DEFIS : Développement des Filières agricoles Inclusives
DGM : Direction Générale de la Météorologie
DRAEP : Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche
DREAH : Direction Régionale de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène
DREDD : Directeurs Régionaux de l'Environnement et du Développement Durable
DREEH : Direction Régionale de l'Énergie, de l'Eau et des Hydrocarbures
ENVI : Environment for Visualizing Images
FIDA : Fonds International pour le Développement Agricole
FPMH : Forage équipés de Pompes à Motricité Humaines
FVC : Fonds Vert pour le Climat
GCM : General Circulation Model ou Modèle de circulation générale

GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupes d'experts Intergouvernementaux sur l'Évolution du Climat
GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GIZ-PRADA : Deutsche Gesellschaft for Internationale Zusammenarbeit, projet Adaptation des chaînes de valeur agricoles au changement climatique
IEC : Information, Éducation Communication
IFVM : Ivontoerana Famongorona ny Valala eto Madagasikara ou CNLA : Centre National de Lutte Antiacridien
INSTAT: Institut National de la Statistique
IPC : Integrity Food Security Phase Classification
MEAH : Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène
MEDD : Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
MESUPRES : Ministère de l'enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
ODD : Objectifs du Développement Durable
ONG : Organisation non gouvernementale
PACARC : Projet d'amélioration des capacités d'adaptation et de résilience face au changement climatique dans les communautés rurales
PAM : Programme Alimentaire Mondial
PCSWMM : Personal Computer Storm Water Management Model
PDO : Points d'eau
PMS : Paysans multiplicateurs de semences
PMA : Pays les Moins Avancés
PNA: Plan Nation d'Adaptation au Changement Climatique
PNCC : Politique Nationale du Changement Climatique
PNLCC : Plan d'Action Nationale de Lutte contre le Changement Climatique
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
PPMH : Puits équipés de Pompes à Motricité Humaine
REEPS: Réservoir d'Eau Enterré Plein de Sable
RCP : Representative Concentration Pathway
RIMES : Regional Integrated Multi-Hazard Early warning System
SDEA : Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement
SESAME : Suivi Eau et Assainissement à Madagascar
SIG: Système d'Information Géographique
SMS : Système de monitoring de la sécheresse
WWF : World Wide Fund for nature ou Fonds Mondial pour la nature

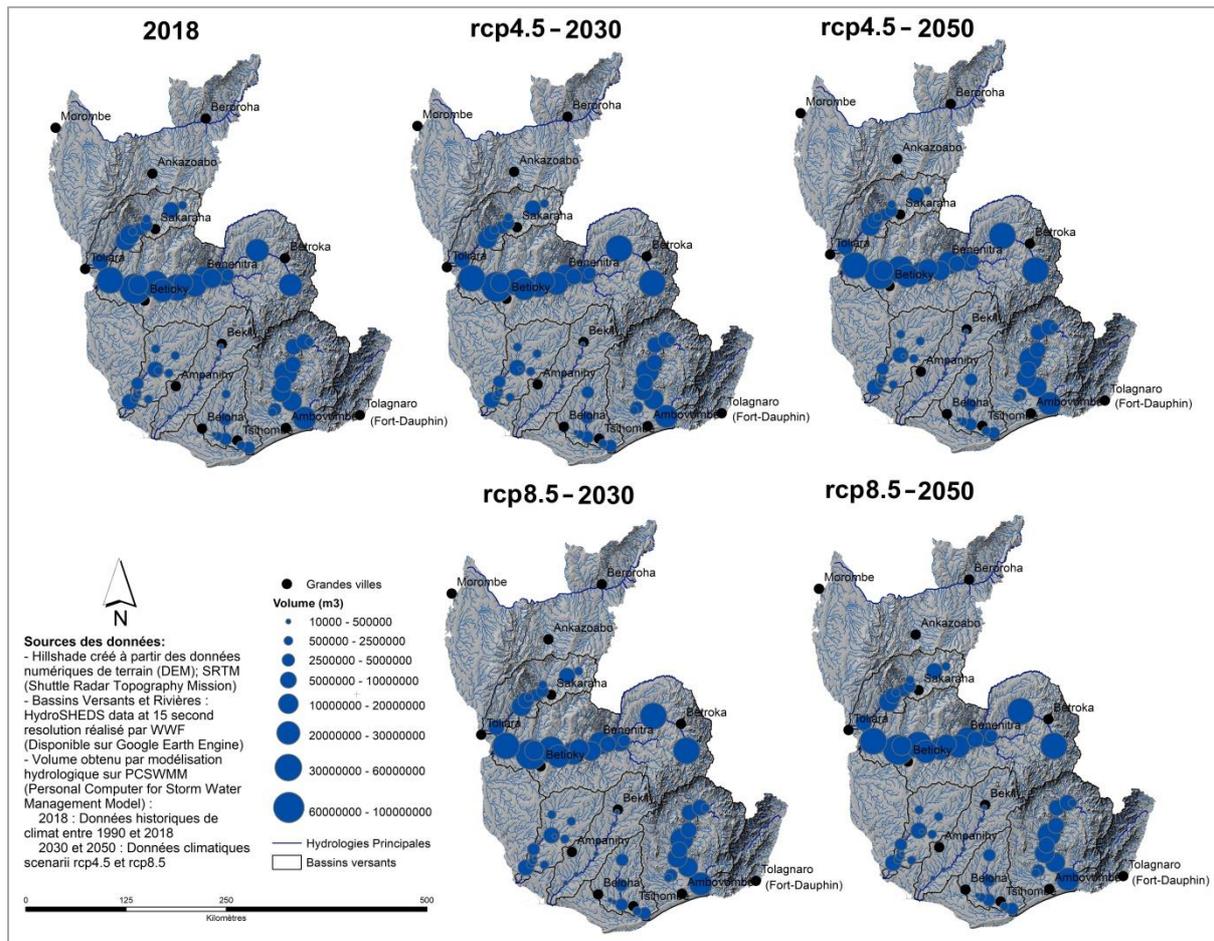
Résumé exécutif

Les trois régions (Atsimo Andrefana, Androy et Anosy) sont parmi les régions les plus affectées par le CC, expérimentant un réchauffement des températures de l'ordre de 1.6°C à 2.6°C depuis 1960. Les précipitations sont variables. Les pluies habituelles, régulières et prolongées, cèdent la place à des pluies torrentielles de courte durée et difficiles à contrôler. Ainsi, les secteurs clés de l'économie et du développement notamment l'agriculture, l'environnement, les ressources en eau, sont menacées. Depuis 2017, Madagascar s'est engagé dans le processus de réalisation de son Plan National d'Adaptation et bénéficie de l'opportunité de fonds qu'offre le Fonds Vert pour le Climat. Le PNUD, en tant qu'agence accréditée, appuie de ce fait l'État Malgache, à travers le MEDD, à la préparation de la note de concept et de la note de fonds de préparation de projet. Le projet est exécuté selon la modalité du PNUD et est piloté par le BNCCCREDD+ en tant qu'Autorité Nationale Désignée du FVC.

Dans ce cadre, des études de vulnérabilité ont été menées avec pour objectif d'évaluer la vulnérabilité actuelle et future du secteur eau pour les trois régions et d'identifier les options d'adaptations adéquates aux horizons 2030 et 2050. L'approche méthodologique pour cette étude de vulnérabilité du secteur des ressources en eau, consiste à évaluer la vulnérabilité physique des ressources en eau (eaux de surface et eaux souterraines), évaluer la vulnérabilité des populations (taux d'accessibilité à l'eau) en relation avec les principaux facteurs socioéconomiques et enfin combiner les principales informations physiques et humaines. Deux étapes ont été entreprises. La première consistait à la collecte d'informations pour mettre en évidence les facteurs environnementaux, socioéconomiques et institutionnels susceptibles de caractériser l'état de sensibilité et de résilience de la population face à la variabilité et aux changements climatiques. La seconde était axée sur modélisation hydrologique utilisant les paramètres physiques, climatiques (températures et précipitations) et documentation sur les eaux souterraines. La vulnérabilité des ressources en eau a été mise en évidence tout d'abord suivant une approche de bassin versant (Fiherenana, Onilahy, Linta, Menarandra, Manambovo, Mandrare) puis par district et par région en utilisant des méthodes de corrélation et des systèmes d'information géographique.

La modélisation hydrologique a été effectuée en utilisant des données des paramètres climatiques dont la précipitation et la température analysées à deux échèles de temps : historiques et scénarii. La période d'analyse des données historiques va de 1990 à 2018. Pour les données de scénarii (projections futures selon le CMIP5 [Coupled model intercomparison project] utilisant des GCM [General Circulation Model]), treize (13) modèles sélectionnés à partir des études réalisées par RIMES (Regional Integrated Multi-Hazard Early Warning System for Africa and Asia) et DGM (Direction Générale de la Météorologie) en 2019 ont été utilisés suivant les scénarii RCP4.5 et RCP8.5. Les données satellitaires ont été utilisées couvrant la totalité des bassins versants des trois régions (5 points de grid). Suivant l'approche AR5 du GIEC, la disponibilité en eaux de surface a été utilisée comme paramètre d'*exposition*, le taux d'accès à l'eau potable et les indices IPC comme *sensibilité* et l'accès à l'eau souterraine comme *capacité d'adaptation*.

D'un côté, pour l'exposition, les précipitations diminuent de 0.5% en 2030 et de 3% 2050 suivant le scénario RCP4.5 ou de 4% en 2030 et de 2% 2050 suivant le scénario RCP8.5. Les températures minimales augmenteront entre 0.95°C et 1,75°C tandis que les maximales entre 1,25°C et 1,85°C. Par rapport aux données historiques et à ces augmentations, les résultats de modélisation hydrologique montrent que le volume des eaux d'écoulement suit une saisonnalité entre 7 et 8 ans. En 2030, une diminution allant de 5,37% à 8,61% du volume d'eau disponible est prévue par rapport aux données historiques entre 1990 et 2018. En 2050, cette diminution varie entre 7.09% et 9.25%. Par rapport aux besoins de la population, ces volumes d'eaux d'écoulement ne sont pas suffisants, et cette diminution les expose.



Carte de l'évolution de la répartition spatiale des volumes d'eau d'écoulement (2018 ; 2030 ; 2050)

De l'autre côté pour la sensibilité et la capacité d'adaptation, le taux d'accès à l'eau dans l'ensemble des régions est seulement de 23%. Pour les eaux souterraines, l'analyse s'est concentrée sur les paramètres de qualité de la nappe et de profondeur de l'eau. Par rapport à l'ensemble de toutes les régions, les districts des régions Androy et de l'Ouest de la région Anosy ont une la meilleure potentialité d'exploitation malgré des notes de vulnérabilité toujours inférieures à la moyenne.

Les alternatives proposées se concentrent sur des programmes et projets d'envergure nationaux, inter-régionaux et régionaux. Ces adaptations concernent l'exploitation des eaux

souterraines dans les régions Anosy et Androy et celle de l'eau de surface à Atsimo Andrefana (Onilahy et Fiherenana). Des projets pilotes ont été proposés. Si l'on souhaite que tous les besoins d'adduction en eau potable soient satisfaits, un montant estimé à 5 182 823 000 USD est nécessaire. D'autres projets pilotes à court et moyen termes ont également été proposés valorisés à 206 000 000 USD : (i) Projet adduction multi-usage Efaho à 159 035 310 USD ; (ii) Suivi de la nappe à 6 820 000 USD ; (iii) Projet ASR (Eaux de surface) à 36 638 550 USD ; (iv) Projet unitaire de Captage de ruissèlement sur les bords de route 51 008 USD (projet pilote) ; (v) Projet AEP Ambohimalaza (projet pilote) 3 490 466 USD.

Mots clés : Madagascar, Région Anosy, Région Androy, Région Atsimo Andrefana, Variabilité climatique, changements climatiques, ressource en eau, exposition, sensibilité, capacité d'adaptation, alternatives d'adaptation

I- Introduction

Contexte général

Le changement climatique est un phénomène reconnu universellement, affectant les caractéristiques du climat global. Les gouvernements et les scientifiques du monde entier effectuent des recherches et réalisent des accords internationaux afin de réduire les causes du changement climatique. Ces accords sont déclinés en politiques, programmes et plans nationaux pour l'opérationnalisation des stratégies de changement climatiques mondiaux. Dans le cas de Madagascar, le pays est dans la phase de développement de son processus de PNA. Le document des Contributions déterminées au niveau national (CDN) de Madagascar intègre une composante sur l'adaptation aux changements climatiques et mentionne explicitement le processus de PNA comme un moyen pour aider à la mise en œuvre et au suivi et évaluation des CDN, « avec une vision d'insérer la dimension changements climatiques à tous les niveaux et dans tous les secteurs concernés » (République de Madagascar, 2015a), comprenant ainsi le secteur eau.

La partie Sud de Madagascar est reconnue pour sa situation climatique aride causant souvent à une sécheresse affectant le mode de vie de la population. Les défis liés aux dérèglements actuels du climat n'épargnent pas cette partie de l'île où le climat est un facteur déterminant sur la dynamique des ressources naturelles et le bouleversement des systèmes agricoles présents. Le Sud est composé de trois Régions *Androy*, *Anosy* et *Atsimo Andrefana*. La zone est structurellement aride et ne reçoit qu'en moyenne 500 mm de pluies par an (BNGRC, 2016). L'effet cumulatif de l'insuffisance des précipitations au cours de la campagne agricole 2014-2015 et un déficit important et prolongé des pluies à cause du phénomène El Niño, atteignant jusqu'à moins de 50% du niveau normal entre septembre 2015 et février 2016 puis en décembre 2020, ont déclenché des conditions sans précédentes de sécheresse dans le Grand Sud de Madagascar. Par conséquent, les moyens de subsistance des populations locales se détériorent et la situation d'insécurité alimentaire et nutritionnelle est très aiguë (BNGRC et PNUD, 2016).

L'insuffisance en eau en constitue l'un des principaux facteurs du « kere » ou famine pour les habitants de cette région. A titre indicatif, les températures ont augmenté de 21,5 à 22,4°C dans la moitié Sud de Madagascar ces dernières décades (MESUPRES, 2015). Par ailleurs, un déficit prolongé de pluies durant les 20 dernières années avait provoqué une situation d'urgence humanitaire ayant affecté entre 200.000 et 1 million de personnes (BNGRC, 2016). La présente étude sur la vulnérabilité du secteur eau dans le Sud de Madagascar face au changement climatique servira à évaluer la situation actuelle et les scénarii probables en termes de disponibilité des ressources en eau. Il décrit la situation hydrologique, socio-économique via des analyses de modélisations hydrologiques sur différentes situations : actuelle et futures (données de scénarii suggérées par le GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur le Climat). Elle proposera en fin de parties les alternatives pour l'adaptation au changement climatique à moyen et long terme et ainsi estimer les coûts de la mise en place de ces alternatives.

Rappel des objectifs de l'étude

Le Gouvernement de Madagascar, conscient des menaces en termes de moyens d'existence que ces chocs et phénomènes météorologiques extrêmes pourraient engendrer davantage dans le Grand Sud de l'île, a confié au PNUD la charge de l'appuyer dans le développement et la mise en œuvre d'un projet d'envergure à soumettre au financement du Fonds Vert pour le Climat (FVC). Principalement, l'intervention du projet sera plus axée sur « l'accroissement de la résilience et l'amélioration des moyens de subsistance des personnes les plus vulnérables et des communautés aux phénomènes climatiques extrêmes dans les 3 Régions d'intervention à savoir la Région Anosy, Atsimo Andrefana et Androy ».

C'est dans ce contexte qu'un appel à proposition a été lancé en vue de la réalisation de la prestation intitulée : ***Assurer l'évaluation des risques et des vulnérabilités du secteur "eau dans la partie Sud (Androy, Anôsy et Atsimo Andrefana), et identifier des mesures de riposte, dans la cadre du projet « Planification de l'adaptation (à moyen terme) dans les secteurs sensibles au climat à Madagascar ».***

Les objectifs de cette étude sont :

- D'évaluer les risques et vulnérabilités du Sud (Anosy, Androy et Atsimo Andrefana), et plus spécifiquement le secteur eau
- De présenter une modélisation du cycle hydrologique des bassins versants avec différents scénarii de changements climatiques et l'évolution des demandes en eau
- De faire une étude bibliographique sur les alternatives d'adaptation pour le secteur « eau »
- De faire une étude de faisabilité des alternatives d'adaptation pour le Sud, en la matière, avec les coûts estimatifs de leur réalisation
- De prioriser les actions identifiées, selon leur importance et urgence, pour améliorer la capacité de résilience de la population locale

1 Cadrage historique et institutionnel de l'étude

A l'échelle nationale, la Politique Nationale du Changement Climatique (PNCC) s'inscrit dans la réalisation du Plan National de Développement (PND). Le PNCC est cohérent avec les objectifs et les cibles des Objectifs de Développement Durable (ODD). Il s'agit en particulier de la transformation économique structurelle et la croissance inclusive, le développement axé sur l'être humain, la durabilité environnementale, la protection et exploitation rationnelle des ressources naturelles et le renforcement de la résilience aux chocs extérieurs.

La lutte contre le changement climatique figure parmi les priorités nationales de l'État. La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) a ainsi été ratifiée en 1998 et le protocole de Kyoto, en 2003. Madagascar s'est désormais engagé à contribuer à réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et à entreprendre des actions liées aux stratégies d'adaptation et d'atténuation des effets néfastes du changement climatique. L'adoption de comportements et de mesures qui contribuent à la lutte contre toutes formes de dégradation de l'environnement en fait aussi partie (MESUPRES, 2015).

Madagascar a signé à Madrid lors du COP25 le Plan National d'Adaptation pour montrer sa volonté politique à lutter contre le changement climatique. La réalisation de ce document cadre est coordonnée par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable par le biais du BNCC-REDD+. Ce document s'articule autour de trois axes stratégiques, à savoir le renforcement de la gouvernance et de l'intégration de l'adaptation, la mise en œuvre d'un programme d'actions sectoriel prioritaire et le financement de l'adaptation au changement climatique.

Appartenant aux PMA, Madagascar est éligible pour bénéficier de l'opportunité de fonds qu'offre le FVC. Le PNUD, en tant qu'agence accréditée, appuie de ce fait l'État, à travers le MEDD, à la préparation de la note de concept et de la note de fonds de préparation de projet. Dans ce cadre, une étude approfondie sur la vulnérabilité et les mesures d'adaptation face aux changements climatiques dans le secteur de l'Eau dans les 3 Régions constitue un préalable important pour le processus PNA.

En collaboration avec le BNCCREDD+, le Programme des Nations Unies Pour le Développement, un projet d'appui à la *Planification de l'adaptation (à moyen terme) dans les secteurs sensibles au climat à Madagascar* a été formulé. Ce projet a pour objectif de répondre à la nécessité d'améliorer les évaluations des risques et de la vulnérabilité liés au climat et d'estimer par la suite les coûts pour les plans de développement sectoriels et nationaux. Parmi les résultats escomptés, les risques et vulnérabilités aux changements climatiques dans le secteur de l'eau sont évaluées, les coûts économiques sont estimés et les options d'adaptation des secteurs les plus vulnérables sont identifiées. Le projet travaille avec des ministères sectoriels dont le Ministère chargé de l'eau et de l'Assainissement et le MEDD en tant que maître d'ouvrage, les institutions nationales ainsi que d'autres partenaires dont le secteur privé.

Après l'élaboration de plusieurs documents par le Gouvernement Malagasy pour répondre aux conséquences du changement climatique sur son développement (Politique Nationale de Lutte contre les Changements Climatiques, Programme d'Action National d'Adaptation au Changement Climatique, Communications Nationales sur le Changement Climatique, Contributions Déterminées Nationales, Plan National d'Adaptation, Plan d'Action Nationale de Lutte contre les Changements climatiques, etc..). Le présent document servira de base pour la « *Planification de l'adaptation (à moyen terme) dans les secteurs sensibles au climat à Madagascar* ».

2 Contextes géographiques et climatiques

2.1. Descriptions sociales et économiques de la zone d'étude

Le Grand Sud de Madagascar est habité de 3,3 millions d'habitants (12% total national). Le climat¹ de la région du Sud est un climat à tendance sub-aride ou semi-aride. La région est formée de plateaux et de plaines sous un climat caractérisé par une longue saison sèche de 7 à 9 mois. L'irrégularité de la saison des pluies est notée en plus des précipitations en faible quantité (moins de 500 mm/an). Cette partie de l'île n'est pas réellement une zone cyclonique. Cependant, les périodes de pluies entraînent de fortes précipitations entraînant des inondations catastrophiques. Les moyennes annuelles des températures sont toujours comprises entre 25°C (Morombe) et 23°C (au sud de l'Onilahy) (WWF, 2010). L'emplacement géographique, accentué par le vent de l'alizé (*Tio-mena*) favorise la sécheresse dans la zone ainsi que les stress hydriques existants.

Dans ces régions, le ratio de pauvreté atteint 87% en milieu rural contre 66% en milieu urbain (INSTAT, 2011), tandis que les valeurs de l'intensité de pauvreté sont de 48% (rural) et de 29% (urbain). L'agriculture et l'élevage sont les activités les plus pratiquées. Plus particulièrement, l'élevage de zébu est l'activité importante et souvent de prestige d'Antandroy. Il offre de bonnes possibilités pour la satisfaction des besoins alimentaires et la création de revenus. La pénurie d'eau limite énormément les points d'eau pour l'abreuvement et les zones de pâturage de ce bétail. L'agriculture aurait pu, non seulement subvenir aux besoins alimentaires des populations rurales et urbaines, mais aussi constituer une source de revenus pour les paysans. Cependant, du fait du climat et de la faible fertilité des sols, l'agriculture ne présente qu'une activité économique modeste soumise à de nombreux

¹ Le Sud Malgache possède aussi une classification locale des saisons (Matangison, 2008) :

- « **Lohatao** » : Cette saison se place juste avant la saison des pluies, entre les mois d'octobre et Novembre.
- « **Asara** » : Cette saison correspond à la période des pluies (fin Novembre à Avril).
- « **Asotry** » : Cette saison est une saison sèche et fraîche (Mai – Juillet).
- « **Fôsa** » ou « **Faosa** » : C'est une saison sèche et chaude (Août - Septembre), cette période se caractérise par la pauvreté en herbe de pâturage.

problèmes. Les surfaces irriguées utilisées pour les rizières sont insuffisantes et mal exploitées, faute de maîtrise de l'eau ; les autres produits alimentaires (manioc, maïs, patate douce, haricot) sont forcément saisonniers car ne se cultivent que pendant les brèves saisons de pluie. Par conséquent, la moindre perturbation du calendrier des pluies provoque des disettes. Les zones où la dégradation des terres est la plus poussée dans le Sud-Ouest qu'ailleurs dans toute l'île (à l'exception de la côte Est et les hautes terres). Cela s'explique par la présence de sols ferrugineux peu fertiles, hautement érodables (Matangison, 2008). Les terrains irrigués autour des grands fleuves de l'Onilahy, du Fiherenana, les vallées du bas Mangoky et les terres arrosées des cours d'eau de Taheza et du Linta sont les plus fertiles (PNUD, 2009) de la Région Sud-Ouest.

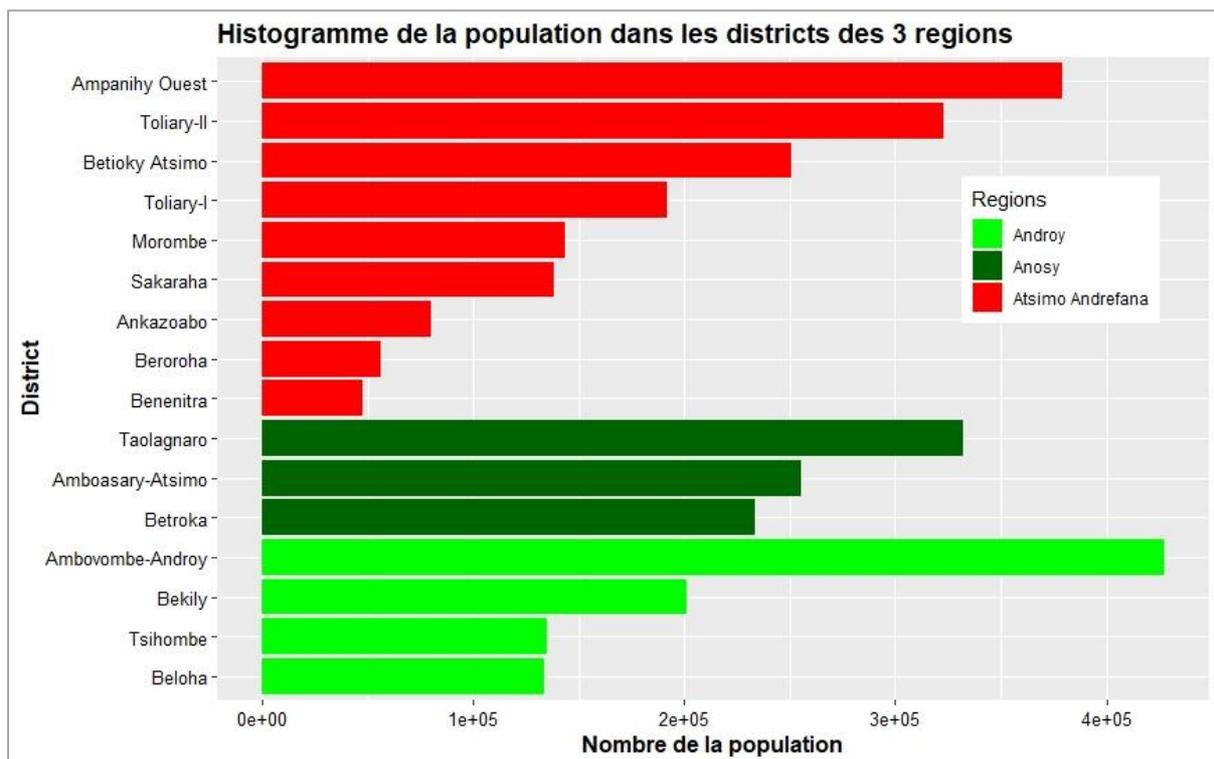


Figure 1. Histogramme de la population dans les 3 régions

(Source: Office for the Coordination of Humanitarian Affairs)

En conséquence, l'économie est de subsistance marquée par un manque d'opportunité de développement, une précarité des conditions de vie et un faible accès aux technologies modernes (communication, éducation, électricité, santé...). En 2010, près de 80% de la population du Grand Sud de Madagascar a été touchée par l'insécurité alimentaire due aux sécheresses. Les trois dernières situations d'urgence remontent en 2002-2003 (impact faible), puis en 2006- 2007 (impact moyen) et en 2009-2011 (impact sévère) (BNGRC, 2016).

2. 1. 1. Région Androy

Selon l'étymologie du mot Androy, « Roy » est une plante endémique qui est spécifique aux zones arides, la signification du nom Androy est ainsi « là où il y a de la sécheresse ». La Région possède de très faibles ressources en eau, soumises à de fortes pressions (remontées eau salée, pluies acides). Trouver de l'eau à la fois en quantité et avec une qualité durable constituent les principaux enjeux. Cette rareté de la ressource se manifeste, en période de sécheresse, par des distances accrues entre les usagers et les points d'eau (30 à 40km), et une forte augmentation du prix de l'eau (jusqu'à 100 000Ar/m³). En termes d'installations, le faible relief de la région impose d'avoir recours à des AEP solaire ou thermique, impliquant une gestion plus complexe et une stabilité de la consommation. Or les périodes de sécheresse entraînent des actions d'urgences (don d'eau), impactant directement la volonté à payer des usagers qui tendent à attendre les approvisionnements (Ran'Eau Malagasy, 2019).

2. 1. 2. Région Anosy

L'hydrogéologie cristalline de la région Anosy n'est pas favorable au développement des eaux souterraines et la région possède en grande majorité des rivières non permanentes (notamment la rivière Mandrare). Différentes problématiques sont identifiées (Ran'Eau Malagasy, 2019) :

- Accès à la ressource : la région ne permet pas d'avoir recours à des technologies simples impliquant des problèmes de pannes et de maintenance des infrastructures mais aussi la nécessaire sécurisation des ouvrages ;
- Difficultés de gestion en raison de retard d'attribution des affermages. La gestion communale, mise en place dans un premier temps, est complexe et les Comités de Gestion de l'Eau dysfonctionnant. Cette transition complique la collecte des redevances sur le long terme en favorisant la mise en place de mauvaises habitudes dès le fonctionnement des ouvrages.

2. 1. 3. Région Atsimo Andrefana

Le relief de la Région Atsimo Andrefana est marqué par la présence de deux grands types de paysages : le domaine calcaro-gréseux et basaltique interne et le domaine côtier occidental. L'hydrologie de la région Atsimo Andrefana est dominée par les cours d'eau et les lacs. Les cours d'eau sont de deux catégories : les cours d'eau à bassin versant mixte, traversant à la fois sur socle cristallin des hautes terres et le bassin sédimentaire de l'Ouest et dont les longueurs dépassent les 400 km et les cours d'eau qui coulent uniquement sur les terrains sédimentaires et ne dépassant pas les 300 km (CREAM, 2013). La situation géographique et géologique de la région constitue un des obstacles sur l'approvisionnement en eau de la région. Il y a une forte minéralisation des eaux souterraines dans la partie littorale et la partie sédimentaire. Les deux districts : Ampanihy Ouest et Betioky Atsimo sont toujours affrontés par la sécheresse. Le niveau d'insécurité est très élevé dans la région (DREEH Atsimo Andrefana, 2019).

2. 2. Variation du climat

2. 2. 1. Au niveau national

Sur l'ensemble de l'île, une hausse des températures moyennes annuelles autant pendant les mois estivales (Décembre, Janvier, Février) que pendant les mois hivernaux (Juin, Juillet et Aout) a été notée (de 1955 à 2005). Cette augmentation varie selon les régions considérées. En général, pendant la saison estivale, la température augmente de 0,2°C à 1,5°C. On note le maximum de hausse dans les régions Analamanga (1,5°C), Atsimo Andrefana (1°C) et Atsinanana (1°C). Le minimum de hausse est enregistré dans les régions Melaky et Ihorombe. Les températures hivernales ont augmenté de 0,1°C à 1,2°C. Les hausses maximums ont été relevés dans les régions Analamanga (1,2°C), Atsinanana(1,2°C), Menabe(1,1°C), Atsimo Andrefana(1°C). L'augmentation minimum a été relevée dans la région Ihorombe (0,5°C) (N. Raholijao, 2007).

Les précipitations augmentent ou diminuent selon la période de l'année et aussi les régions concernés (N. Raholijao, 2007).

Tableau 1. Variations de précipitations selon les régions

<i>Mois</i>	<i>Octobre/Novembre</i>	<i>Décembre/Janvier/Février</i>	<i>Juin/Juliet/août</i>
Augmentation	Sofia, Melaky, Boeny, Ihorombe, Atsimo Andrefana, Androy	Analanjorofo, Alaotra Mangoro, Betsiboka, Atsinanana, Melaky, Menabe,	-
Diminution	Diana, Sava, Analanjorofo, Betsiboka, Analamanga, Itasy, Bongolava, Vakinankaratra, Alaotra-Mangoro, Atsinanana, Vatovavy Fitovinany, Atsimo Atsinanana, Anosy	Diana, Sofia, Boeny, Vakinankaratra, Amoron'i Mania, Haute Matsiatra, Ihorombe, Vatovavy Fitovinany, Atsimo Atsinanana, Atsimo Andrefana	Toutes sauf Atsinanana
Neutre	Menabe, Haute Matsiatra	Sava, Analamanga, Itasy, Bongolava	-

(Source. Raholijao, 2007)

2. 2. 2. Au niveau des trois régions

Dans le sud, autant comme dans le reste du pays, il y a eu réchauffement se manifestant surtout par l'augmentation des températures minimales journalières. De 1961 à 2005, la hausse de la température minimale journalière a été plus de 1°C (TADROSS *et al.*, 2008). Les sécheresses sont de plus en plus fréquentes et deux années sèches se sont succédé de 2009 à 2010, puis de 2012 à 2015, laissant les populations face à des difficultés économiques et alimentaires. Principalement pour l'extrême sud du pays, on note une hausse importante des températures de 1,6°C à 2,6°C. Le long des régions côtières, cette augmentation est de 1,1°C à 1,8°C et dont l'augmentation pour l'ensemble de l'île est de 1,3°C à 2,5°C (BNGRC, 2016). Les précipitations sont devenues irrégulières et non prédictibles. Les pluies habituelles, régulières et prolongées, cèdent la place à des pluies torrentielles de courte durée et difficiles à contrôler, affectant entre autres le stockage et l'arrosage des champs de culture (WWF, 2010).

Évènements extrêmes : Sècheresse, inondation, érosion et ensablement

Le Sud est le monde des extrêmes. Les cyclones provenant du canal de Mozambique et de l'Océan Indien entraînent de fortes précipitations résultant de fortes inondations. Certes les cyclones apportent de l'eau tant espérée, mais les cyclones sont de plus en plus forts, et après leur passage, une période longue et plus prononcée de sècheresse se succède, perturbant ainsi la capacité de ces populations à faire face à ces irrégularités accentuées en une année ou en une saison (Ranjatson et Rakoto Ratsimba, 2015). En général, l'insuffisance de la précipitation et le retard de la tombée des premières pluies sont les principales manifestations du changement climatique dans le Sud. Entre 1980 et 2009, selon (Banque mondiale, 2015a), cinq grandes sécheresses ont touché le Sud. Les sécheresses affectent sévèrement les moyens de subsistance, causant des pénuries d'eau et des pertes de cultures. Il est évalué que près de 80 % de la population du Grand Sud est touchée par l'insécurité alimentaire à cause de la sécheresse (Banque mondiale, 2015). Ce phénomène est lié au phénomène de désertification (Ranjatson et Rakoto Ratsimba, 2015).

L'érosion et l'ensablement sont également importants dans le Sud. Une forte pluie provoque un ruissellement très érosif. En amont, les bassins versants se dégradant, les pertes en terre provoquent l'ensablement des zones de culture, notamment les rizières, des zones d'habitation (cas de Fiherenana) et l'envasement des plans d'eau (Ranjatson et Rakoto Ratsimba, 2015). La présence des vents violents (*Tio-mena*) combinée à l'augmentation de la température entraînent des phénomènes d'érosion éolienne importante. En conséquence, les lits de rivière et les barrages hydroagricoles sont ensablés. Or, le manque d'entretien des infrastructures pénalise de nombreuses parcelles agricoles (Rakotondrabe & Randrianarivelo, 2017).

2. 3. Projections scientifiques du climat : scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5

2. 3. 1. Au niveau national

Le gouvernement Malagasy, à travers la Direction Générale de la Météorologie (DGM), a développé des études sur des projections du changement climatique à des échelles dynamiques appropriées répondant aux besoins des secteurs avec la collaboration de la CPGU et du BNCCC-REDD+. Ces études se basent sur l'AR5 du GIEC avec l'appui technique du « Regional Integrated Multi-Hazard Early warning System » (RIMES). De plus, ce dernier a également fourni à la DGM une assistance technique pour installer et gérer un modèle de climat régional (MCR) pour le domaine de Madagascar afin de déduire les besoins à l'échelle nationale.

La crédibilité des modèles climatiques globaux sur Madagascar se base par leur aptitude à simuler la climatologie actuelle du pays et son domaine climatique environnant. La procédure de l'analyse s'est basée sur des modèles climatiques mondiaux (CMM) du genre CMIP5 utilisés dans le cinquième rapport d'évaluation, AR5, du GIEC. Deux scénarii d'émissions futures de GES ont été la base des projections, à savoir les trajectoires de concentration représentatives (4.5 et 8.5).

Pour l' AR5, quatre profils d' évolution des concentrations de GES (RCP, pour *Representative Concentration Pathways*)² ont été définis : RCP2.6 ; RCP4.5 ; RCP6.0 ; RCP8.5, du plus optimiste au plus pessimiste, nommés d' après la valeur du forçage radiatif induit à l' horizon 2100. Parmi ces quatre scenarii d'émissions, les scenarii d'émissions modérées (RCP 4.5) et élevées (RCP 8.5) ont été choisis pour préparer la projection du changement climatique pour Madagascar. Ces scenarii ont été analysés et résumés pour 2020 à 2099. Ils proviennent des moyennes instantanées des trois tranches de temps typiques représentant des changements à court, moyen et long terme, correspondant aux années 2030 (moyenne de 2020 à 2039), 2050 (moyenne de 2040 à 2059) et 2080 (moyenne de 2070 à 2089).

- RCP8.5 Scénario d'émissions élevées : Le scénario RCP 8.5 correspond au scénario climatique le plus pessimiste avec une augmentation continue du taux d'émission de carbone tout le long du 21^e siècle. Le forçage radiatif atteint plus de 8,5 W/m² d'ici 2100 et continue d'augmenter par la suite, en supposant qu'aucun autre changement de politique ne soit apporté pour réduire les émissions à l'avenir (Riahi *et al.* 2011).
- RCP4.5 Scénario d'émission à moyenne portée (scénario d'atténuation faible) : Le scénario RCP 4.5 correspond au scénario intermédiaire du changement climatique anticipant un pic de maximum d'émission de carbone en 2040 avant son déclin. Le forçage radiatif se stabilise à environ 4,5 W/m² après 2100 grâce à des réductions d'émissions relativement ambitieuses (Van Vuuren *et al.* 2011).

Différents modèles climatiques sont représentés sur la figure 1, présentant les projections sur les cas possibles de changements climatiques. La figure 1 représente les précipitations journalières sur un cycle de 12 mois. Pour la température moyenne (fig.2) et les précipitations moyennes (fig.3), le modèle de circulation général représente également les projections sur la base de calculs relatifs aux différents organes ayant élaboré le modèle.

² Le AR5 du GIEC comportait quatre voies de concentration représentatives qui examinaient différentes émissions futures possibles de gaz à effet de serre. Ces scenarii - RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 - ont de nouvelles versions dans CMIP6. Ces scenarii mis à jour sont appelés SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 et SSP5-8.5, chacun entraînant des niveaux de forçage radiatif 2100 similaires à ceux de leur prédécesseur dans AR5.

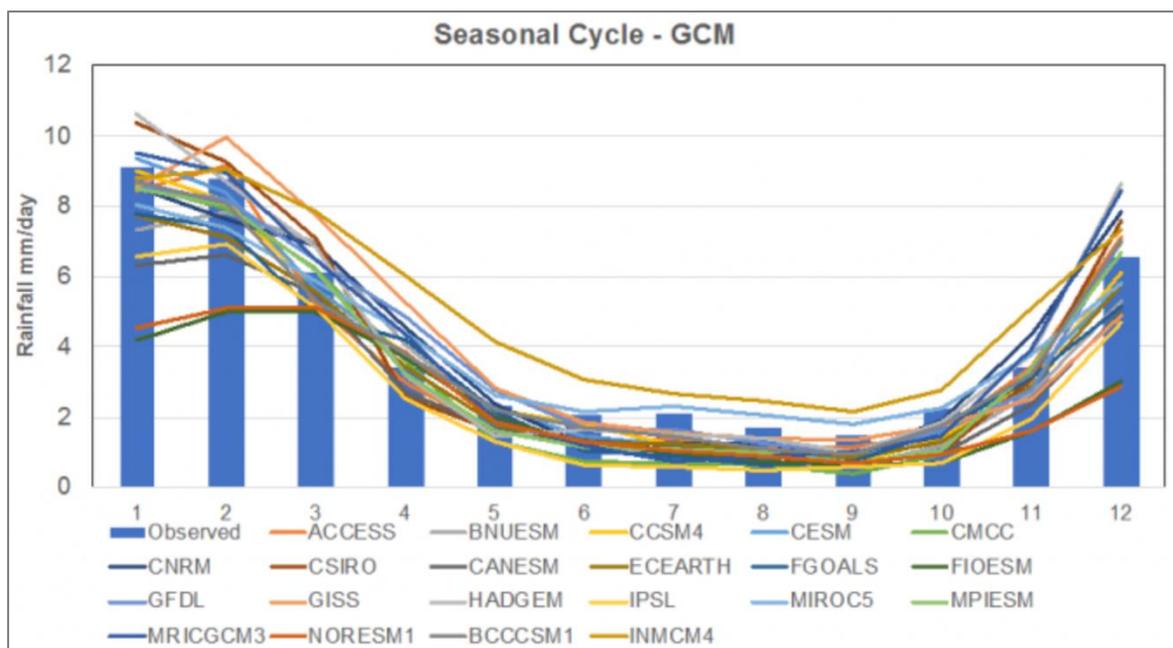


Figure 2. Cycle saisonnier - Utilisation de GCM

(Source. CPGU, 2019).

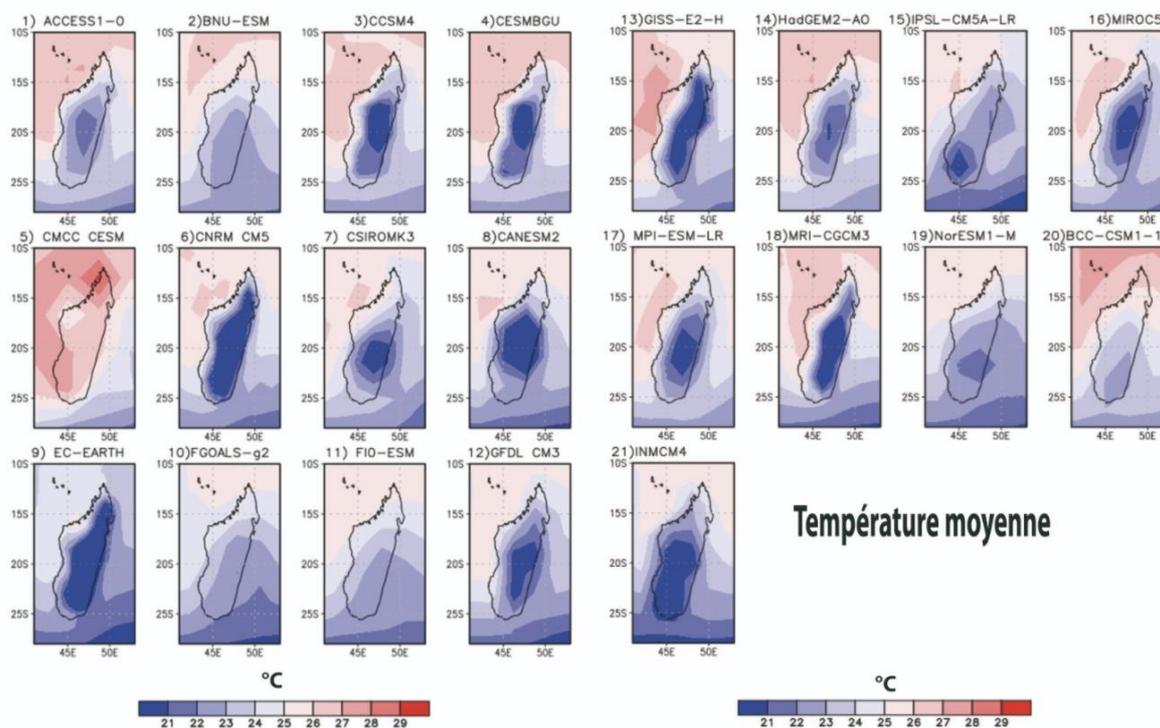


Figure 3. Température moyenne – Utilisation de GCM

(Source. CPGU 2019)

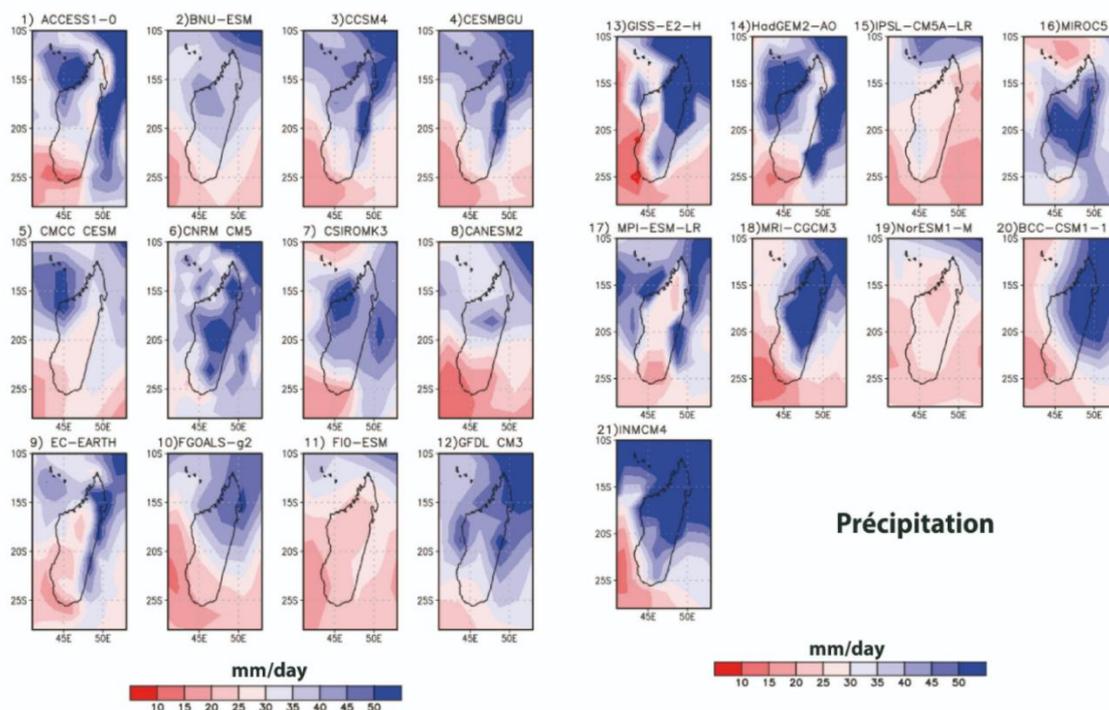


Figure 4. Précipitation moyenne - Utilisation de GCM

(Source. CPGU 2019)

2. 3. 2. Au niveau des trois régions

Selon les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5 de l'AR5, les tendances de changement des caractéristiques climatiques par rapport à 2017 dans les 3 Régions du Sud de Madagascar sont résumées dans la figure ci-après.

Régions	Température maximale (°C)						Température minimale (mm)						Précipitations (mm)					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	2030	2050	2080	2030	2050	2080	2030	2050	2080	2030	2050	2080	2030	2050	2080	2030	2050	2080
Atsimo-Andrefana	1.1	1.6	2.1	1.3	2	3.5	1	1.6	2	1.2	2	3.5	-0.2	-1.5	1.9	-3.7	-0.1	2.2
Androy	1	1.6	2	1.2	1.9	3.3	1	1.5	1.9	1.1	1.8	3.3	-0.9	-4.1	-2.1	-5.1	-3.6	-4
Anosy	1.1	4.6	2	1.2	1.9	3.4	1	1.5	1.9	1.1	1.9	3.3	-0.7	-3.6	-2.7	-4.6	-3.6	-4.8

Figure 5. Extraction des scénarii climatiques au niveau Régional à Madagascar

(Source. DGM & RIMES 2019, p.14)

Les changements climatiques présentent des températures maximales et minimales croissantes, homogènes et similaires aux autres régions. Les impacts du changement climatique résident au niveau des fluctuations des précipitations. La diminution estimée dans les divers scénarii confirme une réduction graduelle de la quantité de pluie. Les Régions Androy et Anosy présentent des valeurs plus ou moins similaires de réduction de la précipitation. Pour la Région Atsimo Andrefana, les valeurs décroissent pour les scénarii des années 2030 et 2050, tandis que le niveau des précipitations augmente à l'horizon 2080 pour les scénarii RCP 4.5 et RCP8.5. Ces augmentations reflètent l'augmentation de la fréquence des extrêmes cycloniques pour ces scénarii dans cette Région.

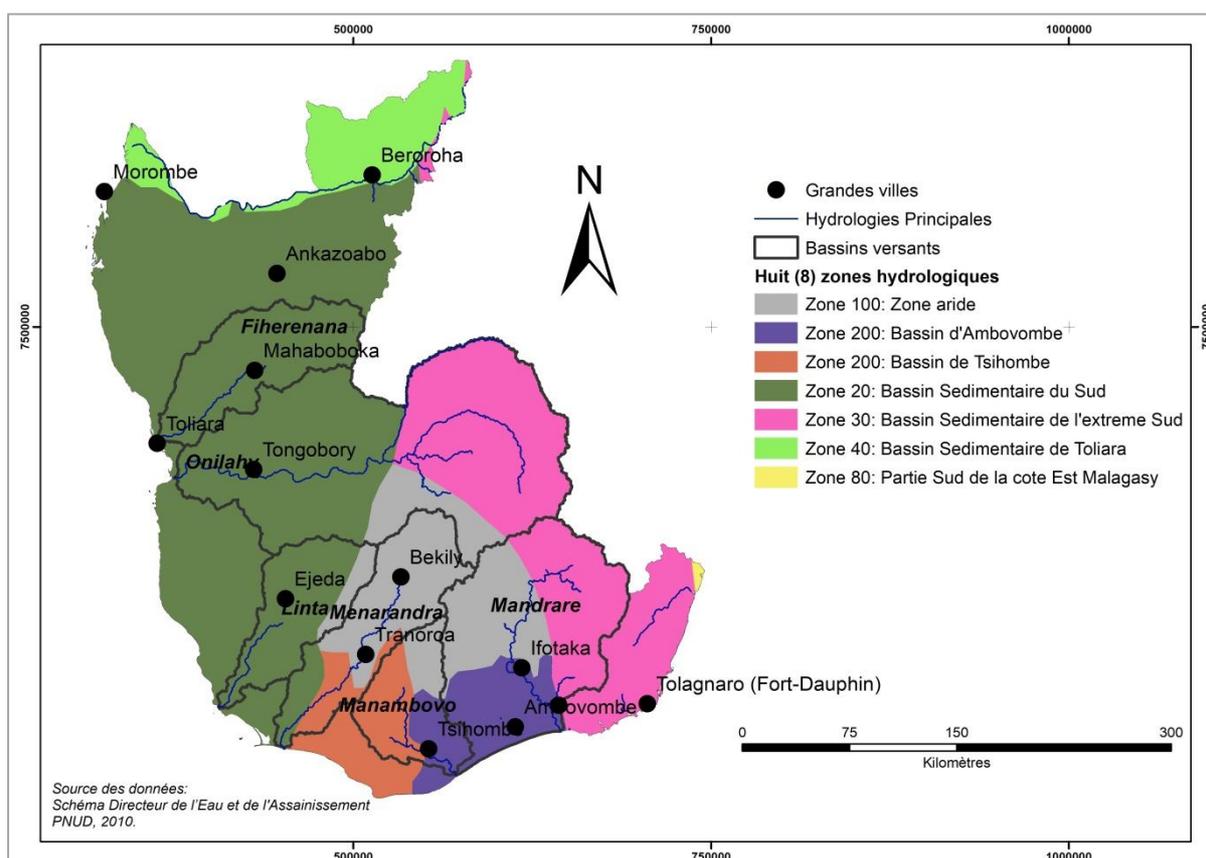
2. 4. Situations en eaux souterraines

2. 4. 1. Ressources en eaux souterraines existantes

D'après le PNUD (2010), l'Agence de Bassin du Sud-Ouest pourrait être divisé en trois parties, la partie supérieure Ouest dominée par des nappes de dépôt sédimentaire post Karoo, l'extrême Sud montrant différentes nappes de dune de sable, et la partie centre sud constituée par des socles et des terrains volcaniques.

Quatre zones hydrogéologiques y sont rencontrées :

- Le socle des hauts plateaux central malgache (zone 10),
- Les formations sédimentaires du bassin de Tuléar (zone 40),
- Les formations sédimentaires de la zone sud (zone 20), et
- Les formations sédimentaires de la zone extrême sud (zone 30),



Carte 1 : Zones hydrologiques dans le Sud

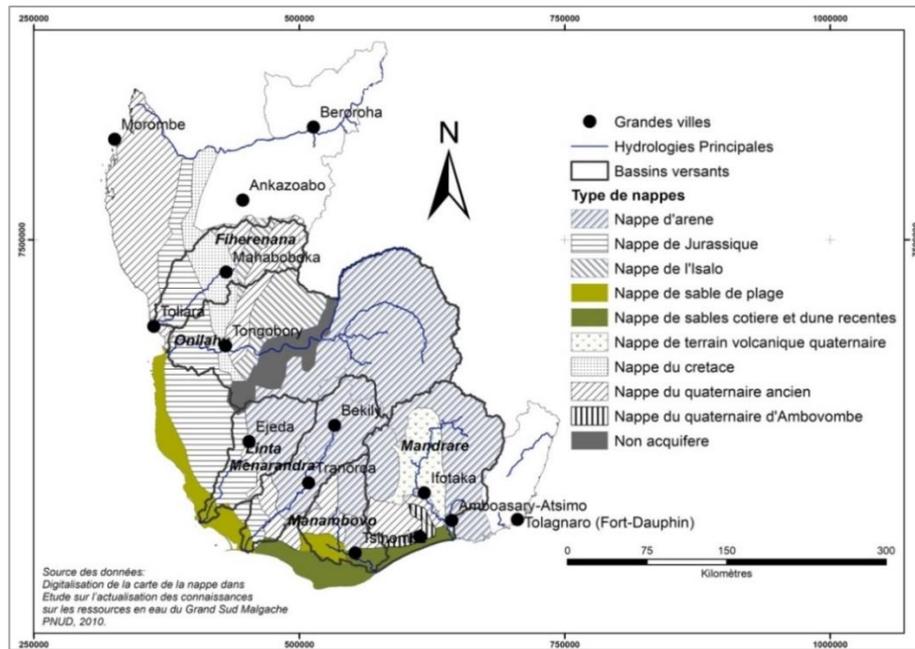
(Source. Adapté de PNUD, 2010)

Mise à part cette subdivision, les différentes nappes rencontrées dans le Sud sont :

- Les nappes de fissure de « socle », comprenant les séries métamorphiques, les massifs plutoniques intrusifs et le massif volcanique de l'Androy. L'aquifère capté est constitué par les fissures et fractures de la roche saine car l'altération est souvent inexistante. Les seuls ouvrages envisageables sont les forages.
- Les nappes de l'Isalo présentant une continuité parfaite de la partie nord de l'île jusqu'au sud. Elles montrent une alternance de faciès marins et continentaux, qui sont en général des grès, grés-sables, marnes, grés à banc calcaire.
- Les nappes de crétacé dont le système supérieur est dominé par des faciès marins, qui sont en général grés-calcaire, marno-calcaire et grés à banc calcaire ; tandis que le système moyen et inférieur est dominé par les faciès continentaux, tels que grés argileux, grés sableux et grés. Elles sont presque cachées dans le bassin.
- Les nappes de l'éocène, nappes dominantes du bassin, composées par le plateau calcaire de Mahafaly. La formation présente en général trois couches successives de bas en haut : de nature calcaire qui devient plus ou moins gréseux dans la partie nord, de calcaire et calcaire argileux, en fin calcaire marneux.
- Les nappes de terrains volcaniques
- Les nappes de sable qui représentent les cinq sous-groupes suivants :
 - Les nappes de sable ancien d'Ambovombe,
 - Les nappes de sable blanc d'Ambondro et de Beloha,
 - Les nappes de quaternaire ancien,
 - Les nappes de sable côtiers et de dunes,
 - Les nappes de sable de plage.
- Les nappes d'alluvions : elles s'éparpillent dans le bassin, ce sont les dépôts des particules fins de l'altération des roches mères. Elles sont plus ou moins étendues de part et d'autre des rives des cours d'eau, très étendues dans le delta de Fiherenana. Les phases graveleuses ou sableuses grossières de ces alluvions sont souvent mélangées à des silts argileux qui en réduisent la transmissivité.

Les autres ressources en eaux souterraines sont les aquifères alluviaux à écoulements permanents. Ce sont les sous-écoulements de la plupart des cours d'eau à régime d'oued³ qui peuvent être captés à partir des barrages souterrains comme la technique utilisée par l'AES pour le captage des sous-écoulements de Mandrare à Amboasary ou celle utilisée par la JIRAMA à Tsihombe pour le captage de sous-écoulements de Manambovo.

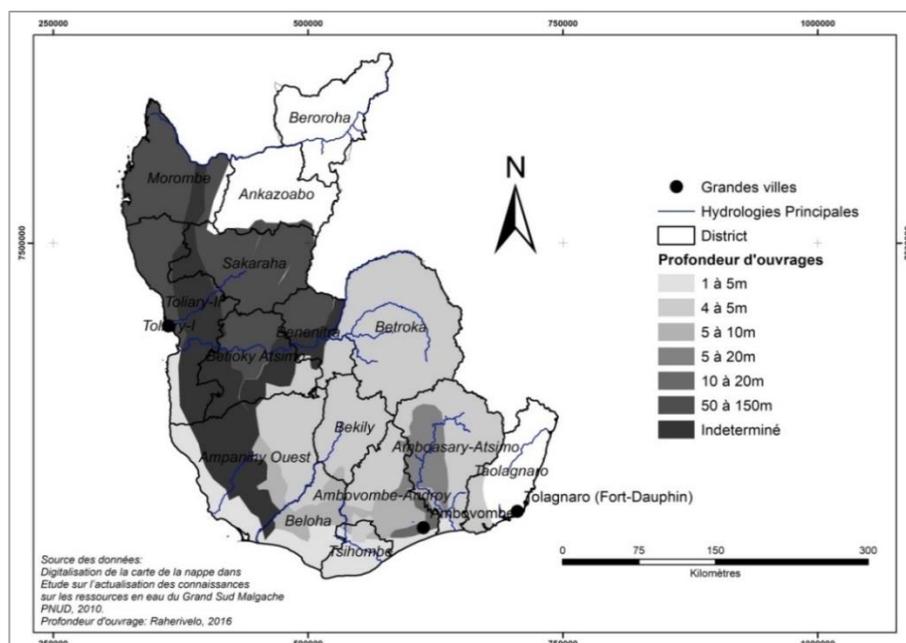
³ Cours d'eau temporaire dans les régions sèches.



Carte 2 : Différents types de nappes dans le Sud de Madagascar
(Source. Adapté de PNUD, 2010)

2. 4. 2. Profondeur estimée de la surface piézométrique

Le niveau, la cote ou la surface piézométrique est l'altitude ou la profondeur (par rapport à la surface du sol) de la limite entre la nappe phréatique et la zone non saturée (encore appelée zone vadose qui est la partie du sol ou du sous-sol situé à l'interface entre atmosphère-pédosphère et la nappe phréatique) dans une formation aquifère.

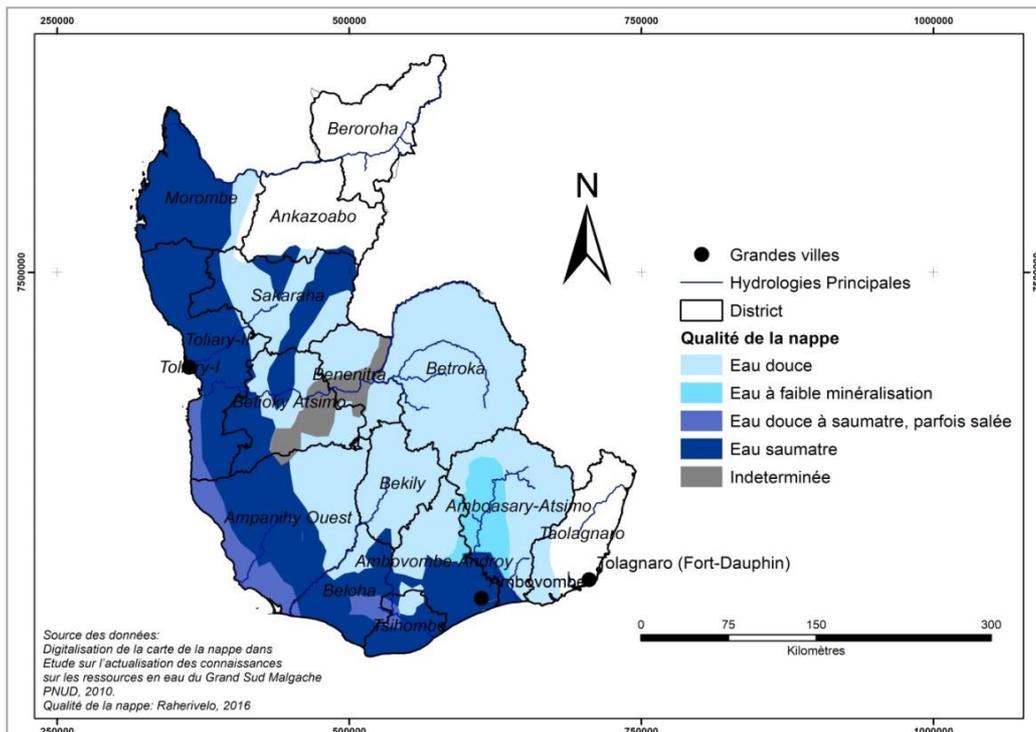


Carte 3 : Profondeur estimée de la nappe
(Source. Adapté de PNUD, 2010 et de Rahevivo, 2016)

2. 4. 3. Qualité de la nappe

Les études passées ont montré une dominance de Sodium et ensuite de Magnésium dans les eaux souterraines dans le Sud de Madagascar se trouvant dans le socle cristallin (Rabemanana *et al.*, 2005). La qualité des eaux souterraines dans les zones cristallines du Sud de Madagascar présente de nombreuses variabilités au niveau spatial. Les zones à forte salinité des eaux souterraines se trouvent dans les localités planes sans mouvement de ruissèlement tel que les sommets des collines ou dans les vallées. Les zones à salinité faible correspondent à des nappes à fortes ruissèlements correspondant à des zones sédimentaires granulaires, zones altérées bien développées ou situées sur les pentes de la vallée (Rabemanana *et al.* 2005).

Le taux de salinité de l'eau souterrain est proportionnel à la profondeur ; la salinité est plus élevée dans les zones sédimentaires que dans les zones cristallines (Serele 2018). Le débit des forages diminue en fonction de la profondeur à cause des limites de perméabilités des zones cristallines (Serele, 2018). La même auteure propose d'encourager les forages à faibles profondeurs autant dans les zones cristallines que sédimentaires pour réduire le risque de forer dans les aquifères salés. Pour les zones sédimentaires, l'auteur recommande l'exploitation des aquifères d'alluvions et les nappes perchées pour limiter les risques de salinité.



Carte 4 : Qualité d'eau de la nappe

(Source. Adapté de PNUD, 2010 & Rahevivo, 2016)

II- Vulnérabilités du secteur « eau » dans la partie Sud

4 Approche et méthodologie

4.1. Collecte de données socio-économiques pour l'évaluation de la vulnérabilité : Approche AR5 du GIEC

Afin d'évaluer le niveau de risque d'inondation/sécheresse pour chaque commune de la zone du projet, l'approche décrite dans le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC AR5) sera utilisée. L'approche AR5 peut être synthétisée par la figure suivante :

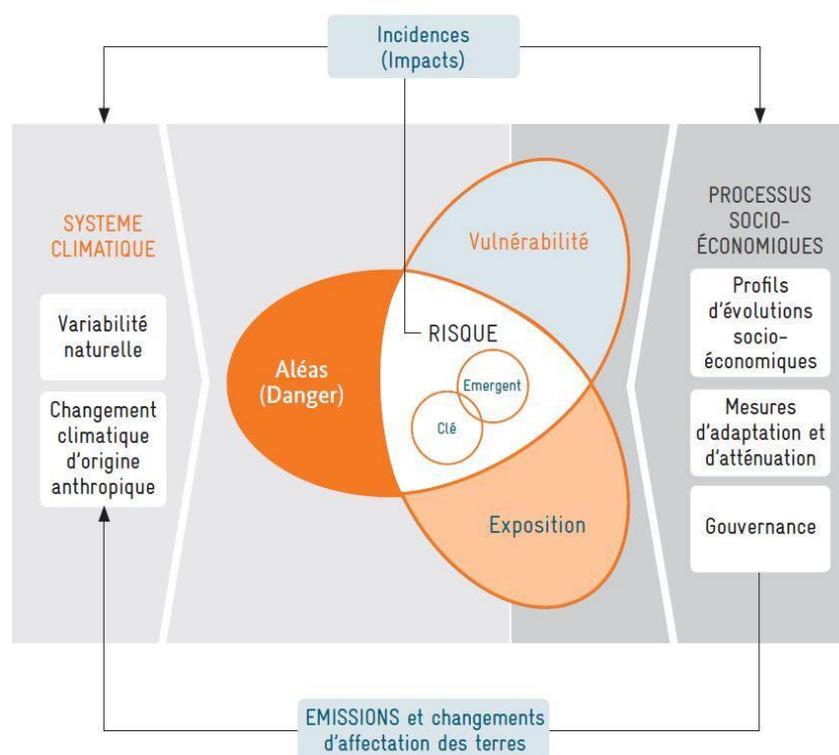


Figure 6. Cadre conceptuel d'analyse des risques

(Source : GTII, AR5, 2014, p.3)

Suivant l'approche décrite dans l'AR5, les définitions des différents composants de l'analyse de risque sont les suivantes :

- **Vulnérabilité** : « Propension ou prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter ». (GIEC, 2014, p. 5)
- **Exposition** : « Présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte, susceptibles de subir des dommages. » (GIEC, 2014, p. 5)

Le processus consiste à déterminer les relations de causes à effets entre les composantes de l'analyse de risque (danger, exposition, vulnérabilité et risque) en fonction de facteur et d'impact. Ainsi, par rapport aux dangers climatiques présents dans la zone d'étude, les risques climatiques potentiels seront hiérarchisés et priorisés et l'exposition ainsi que la vulnérabilité seront identifiées. Ensuite, des indicateurs permettant de quantifier ou de mesurer ces facteurs et impacts vont être identifiés.

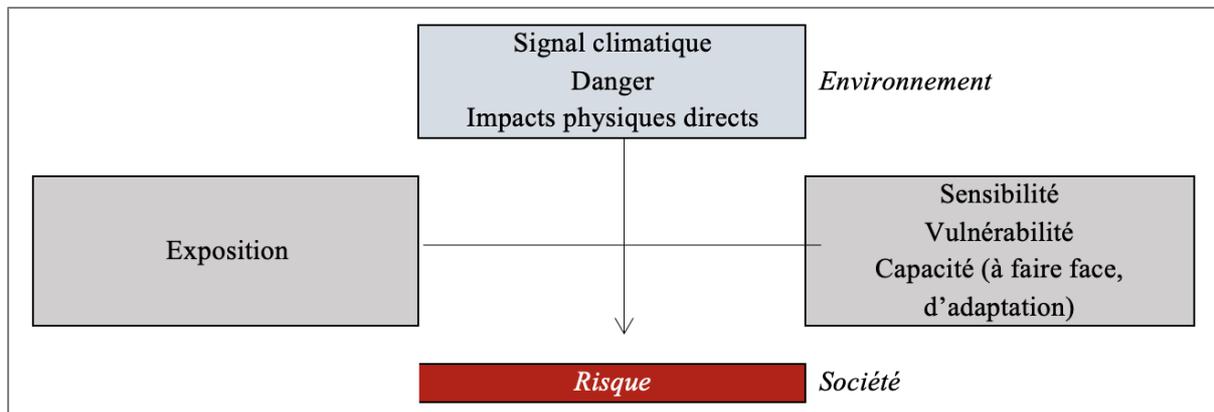


Figure 7. Approche globale d'analyse du risque climatique
Source : GIZ, 2017

Par rapport au présent mandat, les valeurs précises de ces indicateurs vont être estimées à partir de plusieurs méthodes :

- Pour l'estimation des dangers (aléas climatiques), les données issues de la DGM seront utilisées,
- Pour l'exposition, les données statistiques sur la population et les communes issues de l'analyse documentaire ainsi que les données socio-économiques collectées sur terrain seront utilisées ;
- Pour la vulnérabilité (Sensibilité et capacité d'adaptation), les résultats des analyses spatiales associées aux données d'enquête sur le terrain seront utilisés.

4. 1. 1. Consultation des acteurs et collecte de données

a. Au niveau central

Les bureaux centraux des institutions publiques ont été visités pour la collecte des informations sur la situation des 3 Régions en termes de changement climatique, les données climatiques et géographiques.

Direction technique Ministère de l'Eau, de l'Aménagement et de l'Hygiène

Une base de données des systèmes d'adduction d'eau potable est disponible au niveau du MEAH. Ces données concernent la localisation des infrastructures existantes à Madagascar avec leurs caractéristiques techniques ainsi que leur fonctionnalité. Ces données sont disponibles en ligne sur le site spécialisé du MEAH <http://www.mineau.gov.mg:8080/seam/index.php/accueil>. Dans cette base de données, on peut ainsi identifier les caractéristiques des infrastructures en eau dans tout Madagascar sous la forme de fichier Excel ou sous la forme de cartes. De nombreux paramètres sont également

disponibles sur ce site : débit d'exploitation maximale ; coordonnées géographiques, niveau statique, eaux souterraines. La mise à jour des données de la base de données SESAME est effectuée par les partenaires en charge de la mise en œuvre des infrastructures en partenariat avec les Directions Régionales du MEAH.

Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement

L'ANDEA est l'organe étatique responsable de la mise en œuvre du GIRE à Madagascar. Elle délivre l'autorisation d'exploitation pour toute extraction ou exploitation de ressources en eau excédant 1 m³ par h. Elle met à la disposition des partenaires un appui pour la mise en place du périmètre de protection de la ressource en eau. L'ANDEA réalise ses activités par la mise en place de 6 agences de bassin dans tout Madagascar et des comités de bassin. En 2020, trois (3) de ces agences ont déjà été mises en place, grâce au projet financé par le PNUD nommé Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement (SDEA) pour les agences de bassin Centre-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest de Madagascar.

BNCCREDD+

Le BNCC-REDD+ est le bureau national en charge de la coordination des activités relatives au changement climatique et du mécanisme REDD+ relatifs aux mesures d'atténuation du changement climatique par la monétarisation des efforts de réduction des émissions de carbone. Pour les projets relatifs au changement climatique, le BNCC-REDD+ fait partie des membres du comité de pilotage de ces activités. Une présentation de la méthodologie d'approche a été effectuée auprès de cette institution.

b. Au niveau régional

Les différentes entités au niveau des Régions d'intervention ont été interviewées en utilisant des entretiens semi-directifs avec les Chefs de Région respectifs, les DREDD, les DREAH et les DRAEP. Plus particulièrement, pour le DREAH, l'entretien s'est focalisé sur les impacts du changement climatique, les techniques d'adaptation et les divers points des projets en cours.



Photo 1. Entretien avec le DREAH Atsimo Andrefana

c. Auprès des partenaires techniques et financiers

Des enquêtes de type semi-directif ont été réalisées au niveau des partenaires techniques et financiers (PTF) ainsi que les organisations non-gouvernementales œuvrant dans le Grand Sud de Madagascar. Les enquêtes se sont basées sur la description des activités et des approches des projets réalisés dans les 3 Régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy. Les discussions se sont fondées sur les questions d'adaptation au changement climatiques et les visions à moyen et long terme dans ce sens. Parmi ces PTFs, il y a : PAM, CETAS, ACF, DEFIS, GIZ-PRADA, WWF, PNUD (Projet APA et Projet PACARC), UNICEF, IFVM, CRS, BNGRC, AES (Adduction d'Eau dans le Sud) ... Plus particulièrement, l'AES travaille étroitement avec le DREAH. C'est une entreprise étatique. La fourniture d'eau potable par Water Trucking est réalisée dans cette Région avec le prix de l'eau pour 1 bidon de 20 litres à 200 Ariary, 1 camion-citerne (6m³) pour 40 000 Ariary via l'AES. Ce prix varie selon la distance parcourue par le camion.

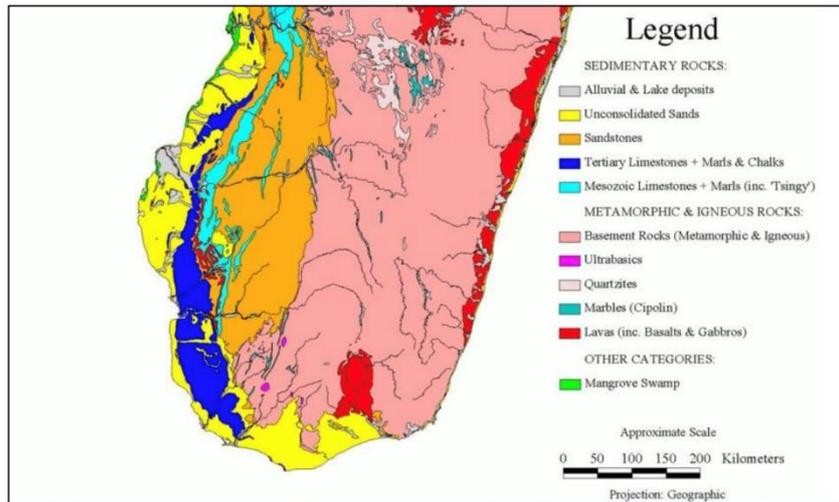
d. Au niveau local : auprès des Communes échantillonnées

Une descente sur le terrain a été faite au niveau des Communes. Ces communes ont été échantillonnées du fait du nombre total élevé de Communes existantes dans les 3 Régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy. La méthode d'échantillonnage par grappe a été appliquée en considérant les aspects géologiques, climatiques et économiques.

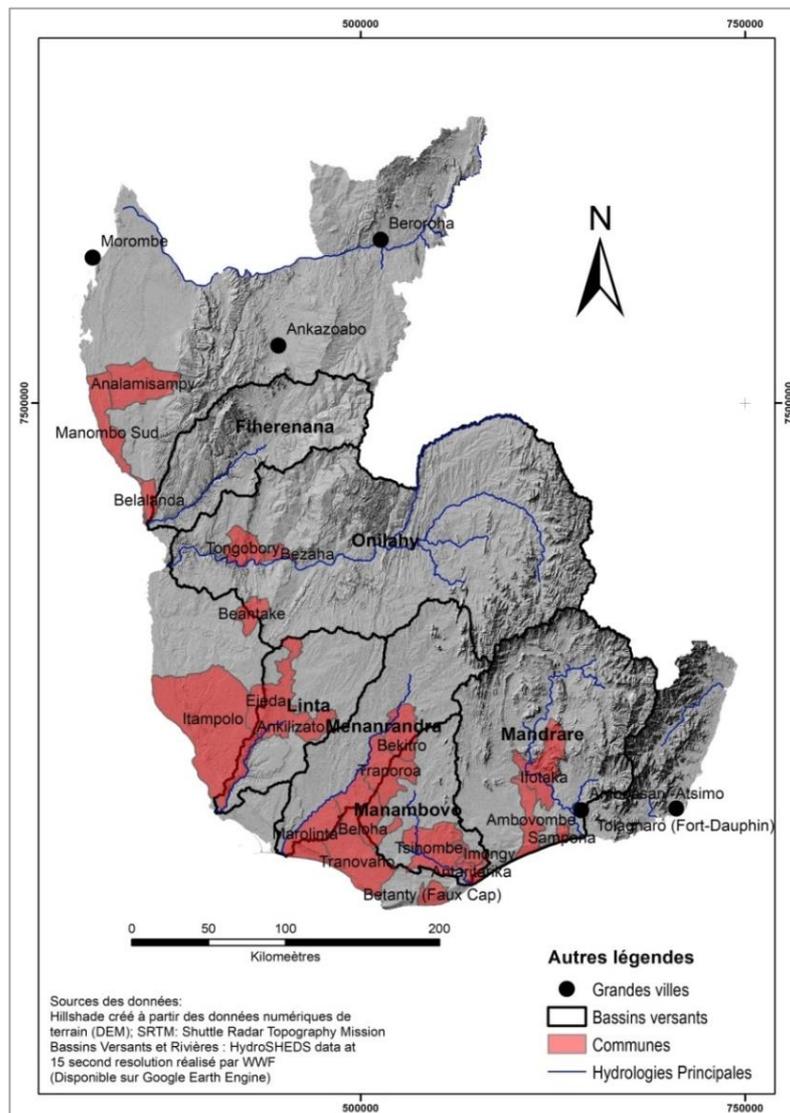
Les caractéristiques des cours d'eau en deux catégories et l'évolution de débits dans l'année ont permis de déduire qu'en période sèche, les zones peuvent être catégorisées comme suit (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017) :

- Les zones localisées dans les zones cristallines ont moins de difficulté sur l'accessibilité et l'exploitation des ressources en eau de surface puisque l'écoulement y est permanent mais de régime variable entre les différentes saisons,
- Les zones qui se trouvent dans les zones sédimentaires sont plus exposées aux difficultés d'accès aux ressources en eaux de surface à cause des pertes d'écoulement dans leur passage sur les calcaires du Jurassique, du Crétacé ou de l'Eocène,
- Les zones situées près du fleuve Mandrare sont moins exposées à l'insuffisance des ressources en eau de surface que celles traversées par les trois autres cours d'eau principaux.

La majorité des zones littorales souffrent du manque de disponibilité en eau quant aux zones cristallines, c'est plutôt de l'accès en eau (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017).



Carte 5: Carte géologique du Sud de Madagascar
(Source. Charmoille 2016)



Carte 6 : Localisation des communes échantillonnées

Les enquêtes au niveau des Communes ont été faites afin de déterminer le niveau de vulnérabilité des Communes face au changement climatique. Cette descente sur le terrain a également permis d'identifier la réalité au niveau de la communauté et des infrastructures existantes. Les impacts des aléas climatiques sont évalués au niveau des zones cibles. Ces aléas sont également notés selon le degré des conséquences. Puis les capacités d'adaptation face à ces aléas sont également évaluées selon leur pertinence, efficacité et durabilité afin de ressortir le niveau de vulnérabilité de la zone en termes de ressources en eau.



Photo 2 : Réunion communautaire dans la Commune Itampolo

4. 1. 2. Analyse de la vulnérabilité

L'analyse de la vulnérabilité en eau des 3 Régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy se traduit par la définition des ressources en eaux existantes et la capacité de la population à utiliser ces ressources selon les besoins réelles de cette population en termes de besoins des ménages, des cheptels et de l'agriculture. La vulnérabilité en eau de la population dans cette zone d'étude est définie selon l'exposition de la population face aux besoins à partir des ressources en eaux de surface disponible. Ensuite, sa sensibilité est représentée par l'utilisation de ces ressources pour l'adduction en eau potable. Et sa capacité d'adaptation se base sur la possibilité d'utilisation des ressources en eaux souterraines disponibles. L'ensemble de ces paramètres décrit le degré de vulnérabilité en eau de cette population pour cette étude. La considération des périodes passées et futures à moyen terme (2030, 2050) permettra de déterminer cette vulnérabilité dans le futur.

4. 2. Exposition : Analyse de l'offre en ressources en eaux par rapport au besoin

La comparaison des ressources en eau disponibles par rapport aux zones administratives couvertes dans les bassins versant permettra d'identifier la nature de l'exposition de la zone face aux problèmes d'accès à l'eau. Ce niveau d'exposition permettra d'identifier le gap ou l'excès d'eau disponible. Le calcul du pourcentage d'approvisionnement en eau de surface des besoins totaux au niveau des Districts concernés a permis de faire la classification des

degrés de vulnérabilité. Le tableau de notation de l'exposition se base sur le pourcentage de réponse des besoins totaux en eau. Ainsi un pourcentage de 100% sera la note maximale de 10 et le reste sera proportionnel à cette valeur de référence (cf. Tableau 3).

Tableau 2. Notation de l'exposition

Notation de l'exposition	Pourcentage de réponse des besoins totaux	Notation de l'exposition	Pourcentage de réponse des besoins totaux
100%	10	25%	2,5
75%	7,5	12,5%	1,25
50%	5	0,5%	0,05

(Sources. Auteurs)

Les besoins totaux considérés dans cette étude sont les besoins des ménages, les besoins des cheptels et les besoins de l'agriculture. Ces besoins seront comparés aux quantités de ruissèlement disponibles au niveau des 6 bassins versants considérés dans cette étude. Les années de référence seront :

- La période entre 1990 et 2018
- Les années à moyen terme 2030 et 2050.

4. 2. 1. Analyse de l'offre : modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique consiste à déterminer la quantité de ruissèlement disponible sur une zone géographique en fonction des facteurs climatiques, météorologiques et géographiques. Cette modélisation est réalisée à partir du logiciel PCSWMM capable de faire une analyse temporelle de la situation en eau dans la zone d'étude selon les données disponibles.

a. Données géographiques

La modélisation hydrologique dans les 3 Régions de Madagascar, Anosy Androy et Atsimo Andrefana requiert l'utilisation des données physiques concernant la zone d'étude. Ces données concernent la superficie, l'élévation et la superficie de la zone. Ces données obtenues en ligne sous la forme de fichiers shapefile. La carte des trois Régions de Madagascar et des sous bassins versants ont été obtenus durant cette étape.

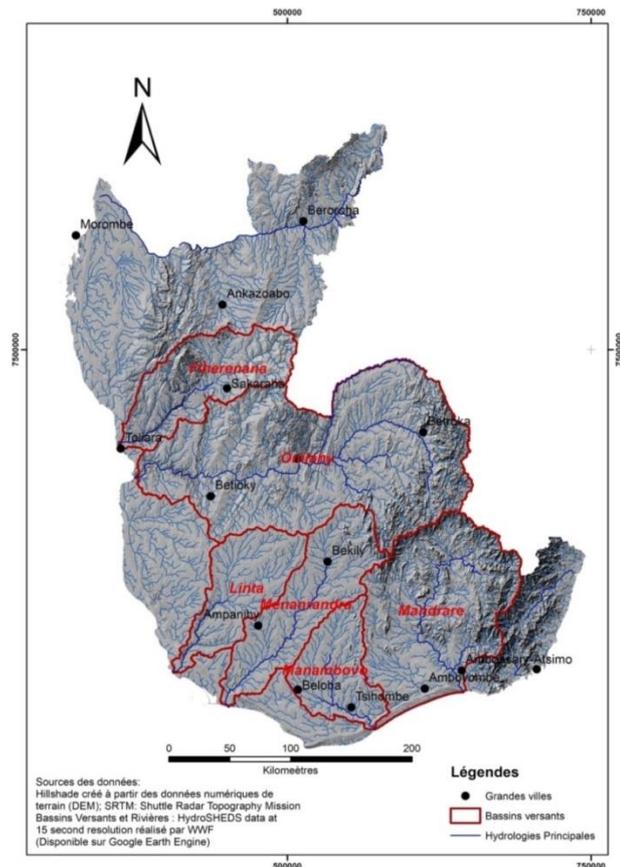
L'approche utilisée dans la modélisation hydrologique et pour évaluer la disponibilité en eaux de surface est une approche sur les Bassins Versants (BV). Le Sud de Madagascar est constitué de nombreux BV présentant des ressources hydrologiques variées avec des cours d'eau pérennes et d'autres temporaires. Les bassins versants correspondent aux territoires géographiques participant à l'approvisionnement des cours d'eau par le déversement et l'écoulement des ruissèlements dans les cours d'eau. Les caractéristiques des bassins versants et sous-bassins versants ont été obtenus par analyse avec les différents logiciels de traitement SIG. Aussi, les caractéristiques suivantes ont été complétés pour les bassins versants choisis

lors de l'étude : superficie, location, lieu de déversement des ruissèlements, cours d'eau, porosité du sol et perméabilité (Détails des BV et des fleuves en Annexe 1).

- Bassin du Mandrare : Permanent
- Bassin du Manambovo : Permanent
- Bassin du Menarandra : Permanent
- Bassin de la Linta : Permanent
- Le bassin de l'Onilahy : Permanent
- Le bassin de Fiherenana : Temporaire



Photo 3. Bassin versant de l'Onilahy



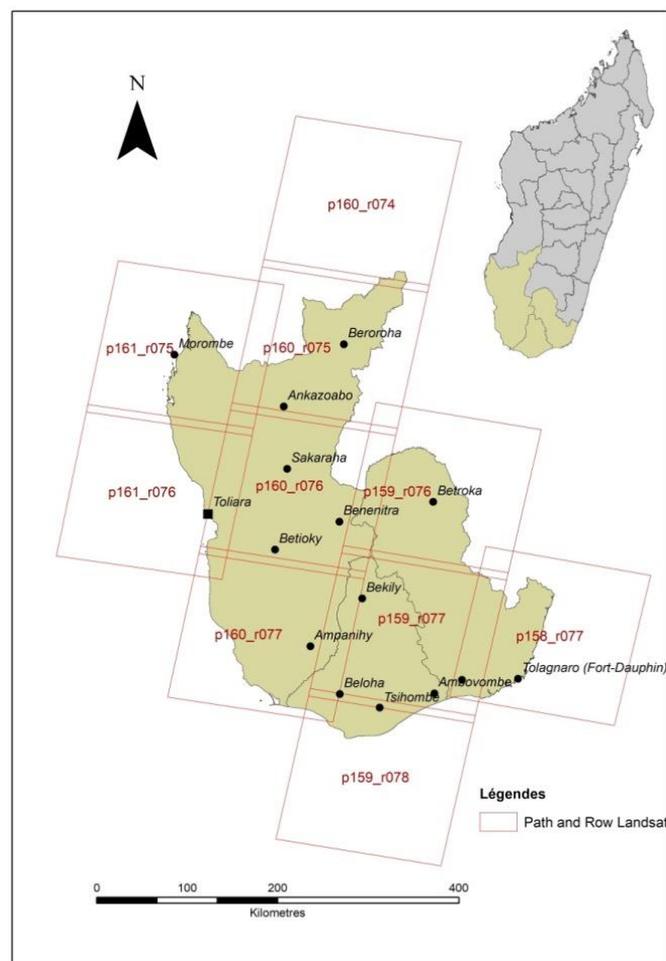
Carte 7: Principaux Bassins Versants et fleuves de la zone d'étude

La modélisation hydrologique permet de faire une analyse hydrologique des bassins versants. Cette analyse se fait par l'introduction des paramètres géographiques et climatiques dans l'outil de modélisation. Le logiciel PCSWMM a été choisi pour la modélisation des bassins versants dans le Sud de Madagascar pour le secteur « eau ».

L'objectif de la modélisation est de faire ressortir la quantité de ruissèlement disponible provenant de la pluie se déversant sur le bassin versant. Cette quantité correspond à la ressource en eau utilisable pour répondre aux besoins productifs en eau.

b. Occupation du sol : traitement d'images satellitaires 2020

L'occupation du sol permet d'identifier le degré de perméabilité du sol. Le traitement des données obtenues des sites spécialisés dans le domaine de l'environnement, couplé avec le logiciel de traitement d'images satellites pour obtention de l'occupation du sol, ENVI. Une carte d'occupation du sol a été réalisée moyennant des techniques de télédétection et de système d'information géographique. Des images satellites Landsat (Satellite : Landsat 8 ; Capteur : OLI ; Résolution : 30 m ; Swath x Width : 185 km x 180 km) ont été téléchargées, puis traitées et classifiées. Ces images ont été acquises en fin de période de saison sèche afin de mieux cerner les écosystèmes forestiers marquant cette partie de Madagascar c'est à dire les forêts sèches. De plus, durant cette saison, la couverture nuageuse est faible facilitant ainsi le traitement des images. Les détails sur les traitements d'images montrent les divers pré-traitements et traitements effectués pour obtenir la carte d'occupation du sol des trois régions (Voir Annexe 12)



Carte 8: Scènes Landsat qui couvrent la zone d'étude

Tableau 3 : Description des scènes d'images Landsat utilisées

Path/Row	Identification de l'image	Date d'acquisition
p158_r077	LC81580772020189LGN00	06 Septembre 2020
p159_r076	LC81590762020276LGN00	07 Octobre 2020
p159_r077	LC81590772020244LGN00	06 Septembre 2020
p159_r078	LC81590782020180LGN00	08 Juillet 2020
p160_r074	LC81600742020267LGN00	05 Octobre 2020
p160_r075	LC81600752020283LGN00	16 Octobre 2020
p160_r076	LC81600762020283LGN00	16 Octobre 2020
p160_r077	LC81600772020203LGN00	07 Aout 2020
p161_r075	LC81610752020226LGN00	22 Aout 2020
p161_r076	LC81610762020258LGN00	20 Septembre 2020

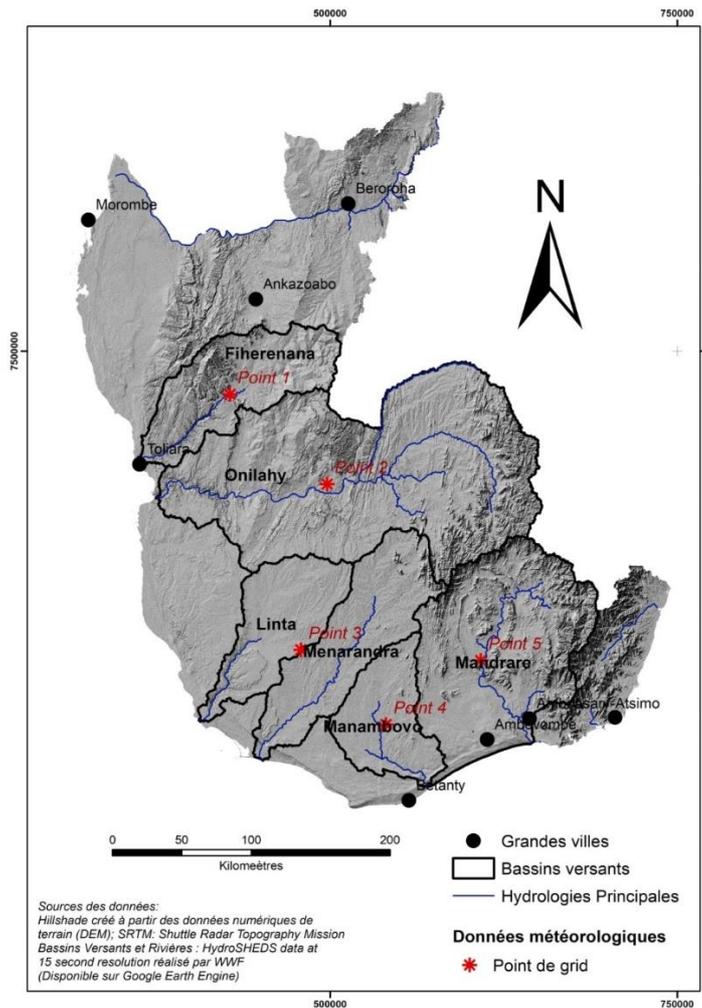
(Sources. Auteurs)

c. Données climatiques : tendance et scenario

Données historiques

La période d'analyse des données historiques va de 1990 à 2018. Les données atmosphériques sont disponibles en ligne selon les techniques de traitement de Harris *et al.* en 2014. Ces données sont disponibles sur <https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html>. Les variables disponibles sont la température minimale moyenne (°C), la température maximale moyenne (°C) et les précipitations totales (mm). La résolution spatiale est de 2,5 minutes (~ 21 km²). Les données correspondantes aux points d'extraction (Points de grid présentés dans la carte suivante) sont par la suite obtenues à partir d'un logiciel SIG.

Dans la modélisation hydrologique, les précipitations sont définies selon les caractéristiques des données disponibles : période, volume ou intensité, localisation des points d'extraction des données. Les températures maximales et minimales, les modèles d'infiltration et d'évaporation choisis doivent également être paramétrés. Puis les options de simulation représentant le début et la fin de l'analyse, la durée des périodes sèches et humides durant un évènement de tombée de pluie.

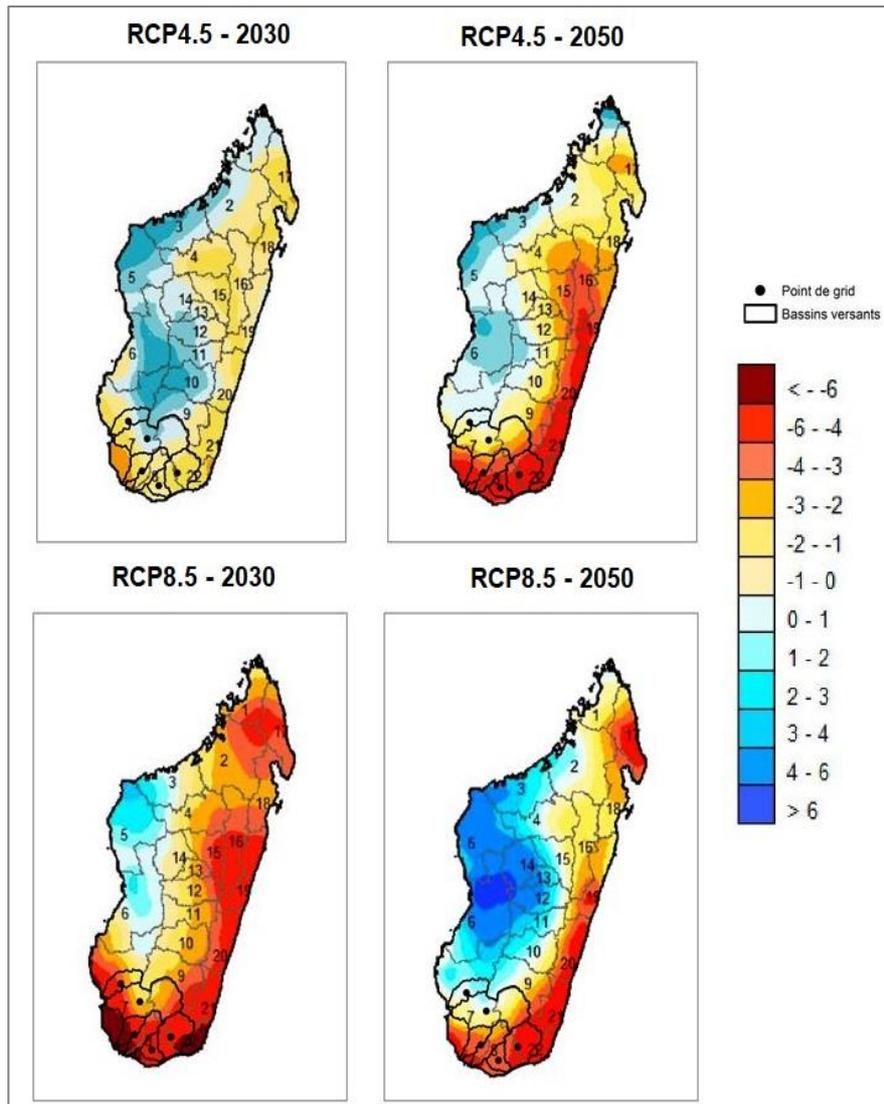


Carte 9 : Localisation des stations météorologiques

Scenarii RCP4.5 et RCP8.5

Vingt et un GCM de l'ensemble de données multi-modèle CMIP5 du Programme mondial de recherche sur le climat, tels qu'utilisés dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (2014), ont été pris en compte et leurs résultats ont été analysés pour Madagascar. Les GCM (General Circulation Model) sont des outils importants pour étudier le changement climatique et faire des projections pour l'avenir. Pour les scenarii à échelle réduite, les projections de changement climatique de CORDEX AFRICA et NASA NEX ont été prises en compte.

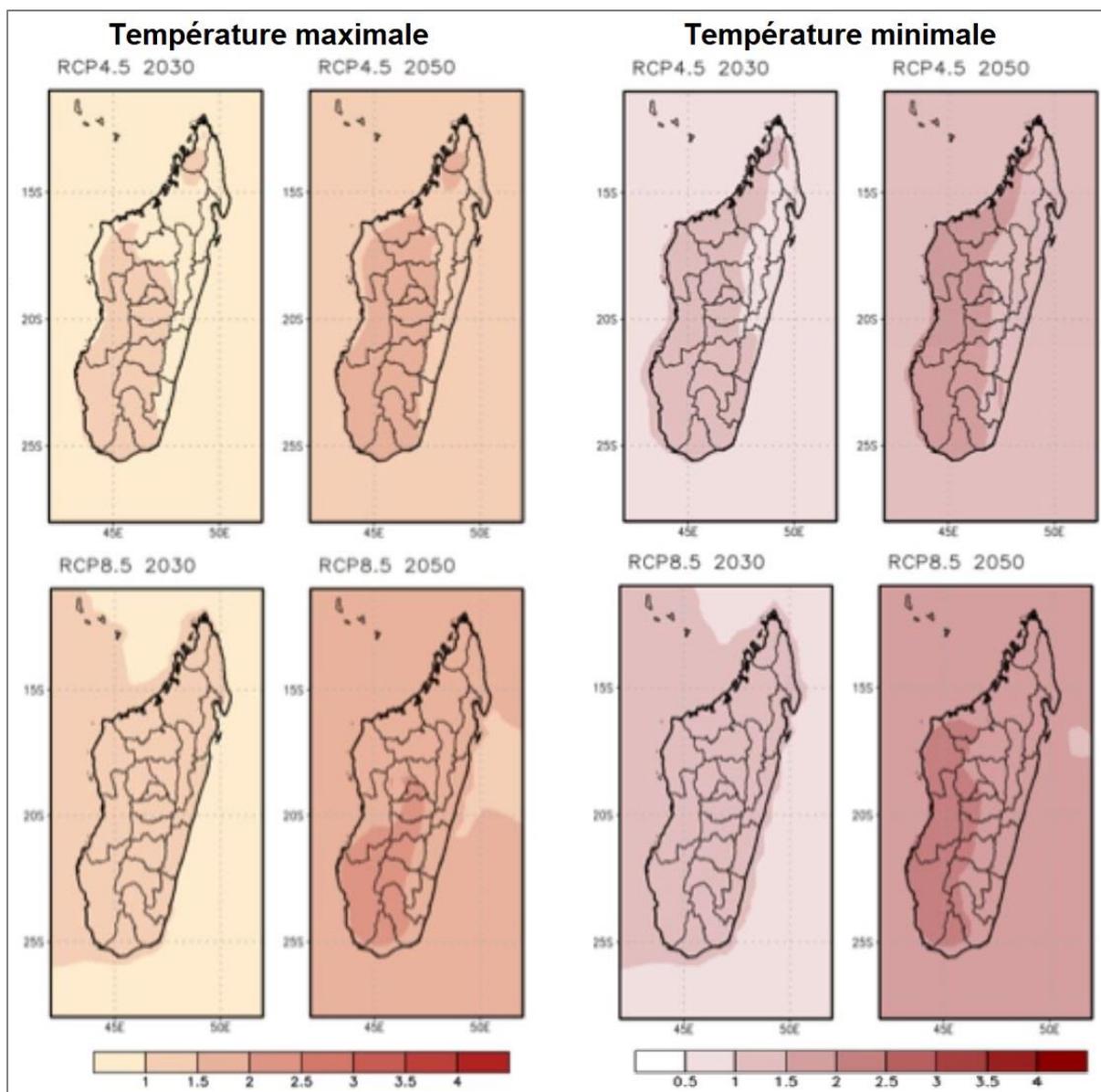
Ces résultats ont été utilisés pour extraire les données climatiques selon les scenarii rcp4.5 et rcp8.5 en 2030 et 2050. Les résultats cartographiques issus du rapport de DGM, RIMES et de CPGU ont été géoréférencés puis les valeurs des précipitations, des températures (minimales et maximales) ont été extraites et calculées. Par la suite, les moyennes des données historiques (entre 1990 et 2018) ont été ajoutées à ces valeurs extraites.



Carte 10 : Écart annuel des précipitations pour deux horizons temporels 2030 et 2050

(Source : DGM et RIMES, 2019)

L'écart annuel des précipitations pour deux horizons temporels 2030 (moyenne de 2020 à 2039) et 2050 (moyenne de 2040 à 2059 à partir des calculs historiques (moyenne de 1971 à 2000), déduit d'ensembles de 7 NASA NEX a réduit les sorties pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5



Carte 11 : Écart de températures maximales et minimales annuelles pour les horizons à deux temps 2030 et 2050

L'écart de températures maximales et minimales annuelles pour les horizons à deux temps 2030 (moyenne de 2020 à 2039), 2050 (moyenne de 2040 à 2059) à partir des essais historiques (moyenne de 1971 à 2000), déduit des ensembles de 16 RCM CORDEX pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5; unité en ° C.

d. Données hydrologiques

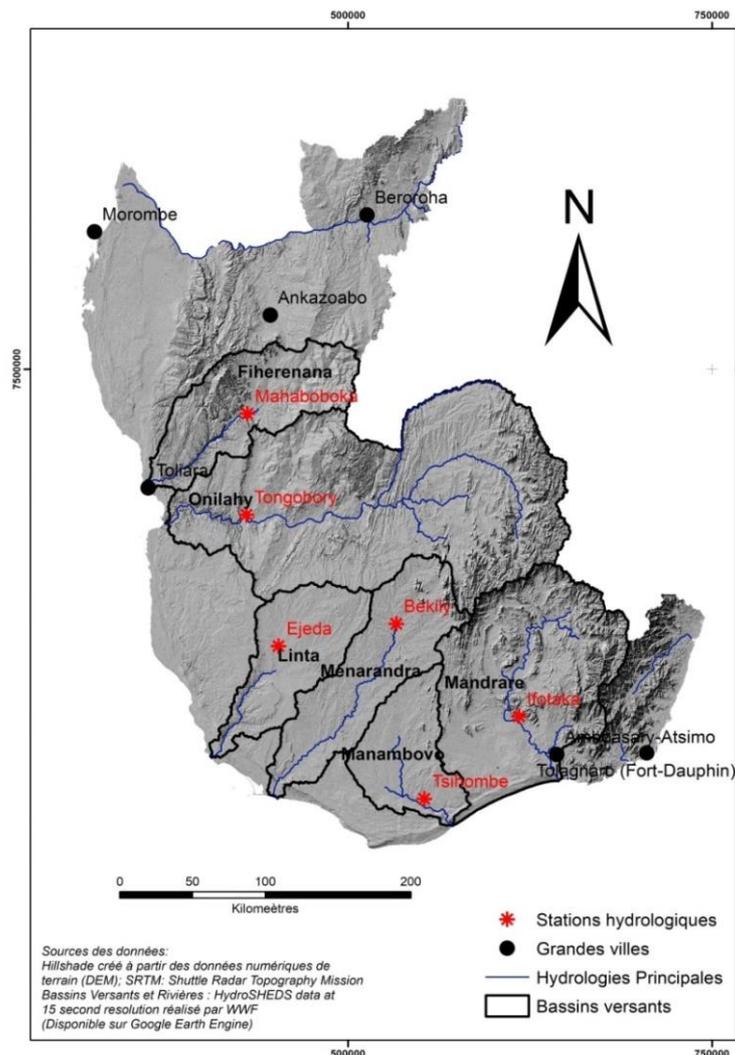
L'hydrologie varie suivant les facteurs environnementaux et sujets à des perturbations quand des cataclysmes naturels frappent la région (sécheresse, cyclone...). A Madagascar, les stations hydrologiques ont été mises en place pour suivre les grandeurs hydrologiques qui varient dans le temps avec des écarts parfois très importants voire aléatoires. Madagascar n'en possède actuellement qu'une quantité encore médiocre de données hydrologiques pour la plupart des régions. En dépit de l'étendue du territoire et de la dimension modeste des

équipes d'hydrologues, une quarantaine de stations de base réparties sur toute île, ont pu être suivies pendant plus de trente ans et de très nombreuses études de terrain ponctuelles ont été effectuées notamment des projets d'aménagement, le suivi des événements cycloniques ainsi de suite. Les données de débits ont été tirées du document « Fleuves et Rivières de Madagascar » par (Chaperon *et al.*, 1993).

Tableau 4 : Liste des localités de stations hydrologiques

BV	Localités	Période de débits
Menarandra	Bekily	1965-1969
Linta	Ejeda	1951-1962
Manambovo	Tsihombe	1956-1976
Mandrare	Ifotaka	1965-1969
Fiherenana	Mahaboboka	1952-1956
Onilahy	Tongobory	1951-1974

(Sources. Adapté de Chaperon *et al.*, 1993)



Carte 12 : Localisation des stations hydrologiques

Les données utilisées pour la modélisation sont les données des années paramétrées. Aussi, pour obtenir les données de débit de ces années, la calibration des données a été réalisée après que les données de précipitations, de températures moyennes et de températures maximales ont été téléchargées.

e. Conditions géographiques

Le bassin versant de la zone est subdivisé en différents sous-bassins versants contribuant à l'apport de ruissèlement dans l'exutoire. Chaque sous-bassin versant possède un nœud représentant le point de rassemblement des écoulements. Puis chaque nœud est relié entre eux par des conduites, naturelles ou artificielles, transportant les écoulements. Chacun de ces paramètres doit représenter les situations réelles de la zone. Pour les sous-bassins versants, les profils climatiques, les superficies, les occupations du sol, les valeurs de perméabilité, les coefficients de rugosité ainsi que les altitudes doivent être initialisés. Il en est de même pour les nœuds avec l'altitude, l'indication de présence de bassin, les flux entrants et les superficies des zones contribuant. Les conduites sont représentées par leur formes et caractéristiques, les altitudes en amont et aval, la rugosité, les flux entrants et les pertes d'énergie.

Le Digital Elevation Model (DEM), les cartes d'occupation du sol, les cartes de délimitation des bassins versants, les cartes des rivières et cours d'eau, les cartes géologiques, les cartes des bassins hydrogéologiques ont été utilisés pour la modélisation géographique des bassins versants.

4. 2. 2. Analyse des besoins en eau

Les besoins en eau ont été calculés sur la base de (PNUD, 2010). Selon ce document, les besoins ont été catégorisés comme suit :

- Eau utilisée par la population : potable rurale, eau potable urbaine, autres usages
- Hydraulique agricole
- Hydraulique pastorale

Pour cette étude, les besoins en eau potable rurale, urbaine et autres besoins ont été mis dans un seul lot. D'après PNUD (2010), les besoins en eau agricole ont été calculés à partir d'un débit fictif continu de 2 l/s/ha bien qu'il puisse y avoir une amélioration du système d'irrigation dans le futur. L'estimation se fait sur la base de la superficie des périmètres fonctionnels avec une double culture sur la moitié de la superficie. Pour les besoins en eau pastorale, en se basant sur la notion d'UBT et en adoptant une augmentation constante des effectifs du cheptel de 15% tous les 5 ans, les besoins en eau pastorale ont été estimés à 12,1 Millions de m³ en 2015 et 14,0 Millions de m³ en 2020 (PNUD, 2010). Les données d'OCHA donnant le pourcentage de la population par district ont été utilisées pour répartir les besoins en eau de la population (eau urbaine + eau rurale + autres besoins). La répartition des autres besoins par district a été effectuée en utilisant la Monographie des régions ayant les données sur le pourcentage de pratiques agricoles et d'élevage.

4.3. Sensibilité : taux d'accès à l'eau potable

La sensibilité de la population des 3 Régions dans le Sud de Madagascar est traduite par son accès à l'eau potable. La possibilité d'utilisation des ressources disponibles pour les besoins de base de la population traduit sa sensibilité face aux ressources en eau. L'identification de cette sensibilité est faite par le calcul du taux d'accès en eau potable de la population dans les Districts considérés par l'étude. Les données sur le taux d'accès à l'eau potable dans ces 3 Régions sont obtenues du site BDEAH du MEAH.

La notation de la sensibilité en ressources en eau est décrite par rapport au pourcentage d'accès à l'eau potable de la population. Tout comme le calcul de l'exposition, le taux d'accès maximal de 100% équivaut à la note de 10 et le reste sera également proportionnel à cette valeur (cf. Tableau 7).

Tableau 5. Notation de la sensibilité

Notation de l'exposition	Pourcentage de réponse des besoins totaux	Notation de l'exposition	Pourcentage de réponse des besoins totaux
100%	10	25%	2,5
75%	7,5	12,5%	1,25
50%	5	0,5%	0,05

(Source. Auteurs)

4.4. Capacité d'adaptation : situations hydrogéologiques (eaux souterraines)

Les eaux souterraines du Sud de Madagascar sont caractérisées par la présence de différentes nappes ayant différentes profondeurs. Les indicateurs pris pour l'étude des eaux souterraines sont :

- Types de nappes présentes
- Profondeur estimée de la surface piézométrique
- Qualité de la nappe

La collecte de données sur les eaux souterraines a été faite grâce aux documents fournis par les acteurs enquêtés et au niveau du MEAH. Les études précédentes sur les eaux souterraines de Madagascar ont fourni des informations importantes et actualisées sur la situation des eaux souterraines à Madagascar (PNUD, 2010). Un autre document consulté est celui de l'ANDEA en 2003. Ce document comprend la profondeur estimée de la surface piézométrique dans le Sud de Madagascar. Selon la publication, la variation de la profondeur de la nappe est en fonction de la surface géologique présente.

Une note a été attribuée à chaque qualité de la nappe et à chaque profondeur d'ouvrage présente dans les trois régions. Ces notes ont été géographiquement pondérées par district, autrement dit en fonction des superficies des zones administratives. Cela signifie que la couche donnant les informations sur la qualité de la nappe d'un côté et celle de la profondeur d'ouvrage de l'autre ont été superposées avec celle de la couche administrative (district). Pour chaque nappe localisée dans un même district, la note de qualité/profondeur de chaque

nappe a été multipliée par sa superficie puis divisée par la superficie du District. Si pour un district, il existe plusieurs (ce qui est la plupart des cas), les notes géographiquement pondérées de chaque nappe ont été additionnées chacune.

Tableau 6 : Note donnée aux différentes qualités de la nappe et des profondeurs d'ouvrage

Nom de la nappe	Qualité de l'eau	Profondeur d'ouvrage	Note Qualité	Note profondeur
Nappe d'arène	Eau douce	4 à 5m	10	8
Nappe de sables côtières et dunes récentes	Eau saumâtre	1 à 5m	4	10
Nappe du quaternaire d'Ambovombe	Eau saumâtre	10 à 20m	4	4
Nappe de sable de plage	Eau douce à saumâtre, parfois salée	1 à 5m	6	10
Nappe de Jurassique	Eau saumâtre	N/A	4	0
Nappe du quaternaire ancien	Eau saumâtre	5 à 10m	4	7
Nappe de terrain volcanique quaternaire	Eau à faible minéralisation	5 à 20m	8	6
Non aquifère	N/A	N/A	0	0
Nappe de l'Isalo	Eau douce	50 à 150m	10	2
Nappe du créacée	Eau douce	50 à 150m	10	2
Nappe de sable de plage	Eau douce à saumâtre, parfois salée	1 à 5m	6	10
Nappe du quaternaire ancien	Eau saumâtre	50 à 150m	4	2

(Source. Auteurs)

4. 5. Calcul de la vulnérabilité en eau des zones d'intervention

Le calcul de la vulnérabilité en ressources en eau utilise la formule suivante.

Équation 1. Calcul de l'impact potentiel

$$IP = \frac{(EX * w_{EX} + SE * w_{SE})}{w_{EX} + w_{SE}}$$

- IP : Impacts potentiels
- EX : Exposition
- SE : Sensibilité
- w : coefficient de pondération

Équation 2. Calcul de la vulnérabilité

$$V = \frac{(IP * w_{IP} + CA * w_{CA})}{w_{IP} + w_{CA}}$$

V : Vulnérabilité

Pour cette étude le coefficient de pondération de l'exposition a été fixé à 4 et celui de l'impact potentiel à 5. Le choix de ces coefficients de pondération est basé l'importance de ces paramètres par rapport à la vulnérabilité en ressource en eau.

III- Résultats

7 Impacts sentis localement du changement climatique

7.1. Disponibilité et accès à l'eau

Les Communes enquêtées sont exposées à la sécheresse chronique se répétant cycliquement tous les 5 ans et les cycles deviennent de plus en plus courts selon l'Adjoint au Maire de la Commune de Bezaha. Cette sécheresse se manifeste par la raréfaction des eaux de pluie et la diminution de la précipitation annuelle. De plus, la répartition des pluies n'est plus régulière et souvent les Communes font face à de fortes tombées de pluie sur une courte période et une longue période sèche. Les impacts de ces changements au niveau climatiques se font ressentir par l'assèchement des cours d'eau de surface et la diminution du niveau des ressources en eau souterraines.

Tableau 7 : Profondeur de l'eau au niveau des Communes échantillonnées

Régions	Districts	Communes échantillonnées	Profondeur de l'eau (m)
Atsimo Andrefana	Ampanihy	Ampanihy ouest	60
Atsimo Andrefana	Ampanihy	Ejeda	60
Atsimo Andrefana	Ampanihy	Itampolo	
Atsimo Andrefana	Betioky	Betioky sud	
Atsimo Andrefana	Betioky	Tongobory	
Atsimo Andrefana	Betioky	Bezaha	6
Atsimo Andrefana	Tuléar 2	Soahazo	60 à 70
Atsimo Andrefana	Tuléar 2	Analamisampy	60 à 70
Atsimo Andrefana	Tuléar 2	Manombo	
Androy	Tsihombe	Antaritarika	25
Androy	Beloha	Tranovao	7
Androy	Beloha	Tranoroa	7 à 15
Androy	Beloha	Beloha	8 à 30
Androy	Tsihombe	Faux cap	3 à 15
Androy	Tsihombe	Imongy	10 à 15
Androy	Beloha	Marolinta	2 à 15
Androy	Tsihombe	Tsihombe	5
Androy	Bekily	Bekitro	18 à 30
Anosy	Amboasary Atsimo	Sampona	Non disponible
Anosy	Amboasary Atsimo	Ifotaka	20 à 25
Anosy	Amboasary Atsimo	Amboasary	18

(Source. Auteurs)

Par ailleurs, le coût des bidons d'eau potable augmente et la population est forcée de payer cher le prix de l'eau ou de chercher d'autres alternatives non-efficaces telles que l'utilisation d'eau saumâtre. L'augmentation du prix de l'eau est fulgurante car en période normale, le prix d'un bidon varie de 50 à 1500Ar. Puis durant les périodes de sécheresse, le prix peut atteindre entre 1500 et 3000Ar⁴. La raréfaction des ressources en eau est ainsi à considérer car elle est coûteuse pour les ménages.

Les alternatives d'accès à l'eau de la population sont des marres d'eau saumâtre non conforme aux besoins d'eau potable. De plus, les eaux disponibles sont utilisées prioritairement pour l'abreuvement des cheptels avant de répondre aux besoins de la population. Les femmes sont souvent les responsables pour trouver des sources d'eau pour le ménage et souvent elles doivent faire plusieurs kilomètres pour trouver des sources d'eau disponibles.



Photo 4 : Puits construites le long de la RN10 vers Ambandro

Photo 5 : Charrettes transportant de l'eau vers Sampoina

7. 2. Pratiques agricoles, d'élevage et de pêche

L'agriculture est dépendante des conditions climatiques et hydrographiques au niveau des zones de culture. La raréfaction des précipitations ainsi que l'assèchement des cours d'eau impactent sévèrement l'agriculture dans les Régions du Sud de Madagascar. Avec les différents aléas ayant touché les zones agricoles dans le sud, de nombreux terrains agricoles ne sont pas productifs à cause de l'ensablement (Tio-mena), de l'assèchement (sécheresse) et de l'infertilité du sol (érosion). Les paysans s'adaptent tant bien que mal en variant les spéculations adaptées aux conditions climatiques mais l'incertitude et l'irrégularité des conditions climatiques influent dans le choix des calendriers agricoles. L'agriculture dans le Sud de Madagascar est encore traditionnelle et les moyens de production ne sont pas encore suffisants pour une augmentation du rendement et l'amélioration de la productivité. Malgré un potentiel important en capital foncier et la possibilité d'amélioration du rendement, les

⁴ 50 Ar/bidon dans les Districts de Tulear 2 et de Betioky, 1500 Ar/bidon dans le District de Tsihombe, 3000 Ar/bidon dans le District de Beloha

problèmes d'irrégularité des ressources en eau sont couplés avec les problèmes sociaux en termes de dépendance aux aides et donations.

D'après les enquêtes réalisées, les impacts suivants ont été les plus perçus par la communauté locale. Ces impacts illustrent bien que le Sud correspond à la région des extrêmes, soit les fortes tempêtes et cyclones sévissent, soit c'est la sécheresse s'étalant sur une période longue (3 à 5 ans) :

- Pertes en terrains agricoles
- Abandon des cultures
- Destruction des infrastructures (en plus des barrages qui sont vétustes)
- Alimentation insuffisante pour les hommes et les bétails
- Diminution du nombre de cheptel
- Hausse de maladies de cheptels

La durée de la période de soudure varie entre 5 et 8 mois (généralement entre Octobre et Avril). Les principales spéculations sont le riz, le maïs, le manioc, la patate douce, l'arachide et le haricot. Les principaux problèmes rencontrés concernant l'agriculture et l'élevage sont :

- Insuffisance d'intrants
- Problème d'irrigation (manque d'eau, pas de pluies)
- Erosion éolienne (Tio-mena)
- Insectes ravageurs (Chenilles légionnaires)

Pour le secteur de l'élevage, ce sont les élevages bovins, caprins, ovins et porcins qui sont les plus pratiqués. La distance séparant les terrains d'habitation des terrains de pâturages varie de 1km à moins de 10km, quelquefois jusqu'à 20 km (Marolinta et Tranoroa) en situation d'aléas. Pour le secteur de la pêche, le taux de pratique et l'effort de pêche ne cessent d'augmenter dans les régions. Cependant, la réduction du rendement par prise se fait ressentir dans le secteur et certaines espèces sont en voie de disparition à cause de la destruction de leur habitat. De nombreux agriculteurs s'orientent vers les activités de pêche à cause de la sécheresse.



Photo 6 : Multi-usage des ressources en eau disponibles

7.3. Impacts socio-économiques et sur la santé

Les aléas climatiques ont de forts impacts sur les revenus des ménages car dues aux inondations et sécheresse, la production diminue de manière importante. Les ménages sont ainsi contraints de trouver des alternatives pour leur nutrition qui ne sont pas souvent efficaces. D'un autre côté, les cas d'inondation à niveau moyen sont généralement bénéfiques aux agriculteurs par la possibilité d'utilisation de nouvelles zones agricoles pour une période déterminée. Les problèmes de conflits d'intérêts entre les différentes ethnies ont également des impacts négatifs quant à la répartition des ressources naturelles en eau. Certaines zones ayant accès à l'eau en abondance ne veulent pas partager la ressource avec d'autres ethnies. De plus, certaines pratiques concernant le partage de la ressource tel que l'utilisation du « Water Trucking » créent des situations d'inégalité pour ceux ayant les moyens et les plus vulnérables. Les aides d'urgence ont également des impacts considérables sur le mode d'actions de la population qui favorise la dépendance envers ces donations et aides internationales par rapport à la réalisation d'actions concrètes à long terme. Cette situation peut être identifiée dans les cas de construction d'infrastructures d'adduction d'eau potable et de greniers communautaires.

Mis à part les impacts socio-économiques, les maladies hydriques (Bilharziose, diarrhée, maladies cutanées) sont récurrentes. D'autres maladies comme le paludisme, la fièvre typhoïde, les maladies pulmonaires, la tuberculose ont également été recensées. Quant à l'éducation, cette zone de Madagascar fait partie des « Grands Oubliés ». Le nombre d'écoles primaires suffit à peine à héberger les élèves (pouvant être scolarisés par les parents) qu'à la sortie du CEPE, seules une ou deux collèges sont disponibles pour accueillir les élèves. En situation d'aléas climatiques, le nombre d'enfants scolarisés diminuent comme à Marolinta par exemple (70% sans aléas, 55% avec aléas). Enfin, selon les données des enquêtes, la charge de travail pour les femmes dans la collecte d'eau (car généralement c'est une des tâches de la femme, sauf dans le cas où l'homme utilise un moyen de transport comme la charrette pour aller acheter de l'eau avec un container plus volumineux) est accrue mais varie selon les Communes.

7.4. Exposition et impact du changement climatique selon le cadre intégré de classification de la sécurité alimentaire

Le Cadre intégré de classification de la sécurité alimentaire est un ensemble d'outils d'analyse et de processus permettant d'analyser et de classer la sévérité de l'insécurité alimentaire suivant des normes scientifiques internationales. Le cadre informe sur l'insécurité alimentaire aiguë actuelle, l'insécurité alimentaire aiguë projetée et la malnutrition aiguë actuelle. Mise à part la localité des zones, ce cadre donne également des informations sur la sévérité de la sécurité alimentaire :

- Phase 1 : situation acceptable
- Phase 2 : situation de stress
- Phase 3 : situation de crise
- Phase 4 : situation d'urgence

Sur la dernière période d'évaluation (Octobre – Décembre 2020), 1.06 million de personnes sont identifiées en insécurité alimentaire aiguë élevée (Phase 3 de l'IPC et plus), soit 27% de la population analysée dont 204 000 personnes en phase d'Urgence (Phase 4 de l'IPC) et 859 000 en Crise (Phase 3 de l'IPC). Sur la période projetée de Janvier à Avril 2021, la situation se détériore avec 1,35 million de personnes susceptibles de passer en insécurité alimentaire aiguë élevée (Phase 3 de l'IPC et plus). Effectivement, 282 000 de personnes se trouveront en Urgence (Phase 4 de l'IPC) et 1,067 million en Crise (Phase 3 de l'IPC) (IPC, 2020).

Sur la période d'Octobre à Décembre 2020, sur les treize districts analysés, Amboasary Atsimo connaît une situation d'insécurité alimentaire très inquiétante avec 20% de sa population en Urgence (Phase 4 de l'IPC) et 45% en Crise (Phase 3 de l'IPC). Il est suivi par les districts de Bekily, Ambovombe et Beloha classifiés en Crise (Phase 3 de l'IPC) avec une proportion importante de population en Urgence (Phase 4 de l'IPC), avec 10% pour Ambovombe et Beloha et 15% pour Bekily.

Sur la période projetée, la majorité des districts risquent d'être gravement affectés par l'insécurité alimentaire : Bekily basculera en Urgence (Phase 4 de l'IPC), et Amboasary Atsimo restera dans la même phase (Urgence). Malgré les aides prévues, plusieurs districts seront en situation de Crise (Phase 3 de l'IPC) et verront en même temps la proportion de personnes en Phase 3 de l'IPC (Crise) et plus augmenter significativement par rapport à la période courante : Ambovombe, Tsihombe, Beloha, Betioky, Ampanihy, Betroka. Les cinq communes de Fort-Dauphin figurent également dans cette liste de zones à forte proportion de personnes atteintes par l'insécurité alimentaire aiguë élevée.

Concernant la malnutrition aiguë, de Novembre à Décembre 2020, deux districts sont en phase Sérieuse (Phase 3 de l'IPC de la malnutrition aiguë), Amboasary Atsimo et Betroka, sept districts sont en phase Alerte (Phase 2 de l'IPC de la malnutrition aiguë) et un district en phase Acceptable (Phase 1 de l'IPC de la malnutrition aiguë) : Betioky Atsimo. Entre Janvier à Avril 2021, la situation nutritionnelle devrait se détériorer avec le district d'Amboasary Atsimo qui basculera dans une phase Critique (Phase 4 de l'IPC de la malnutrition aiguë) et les districts d'Ambovombe, Bekily et Ampanihy en phase Sérieuse (Phase 3 de l'IPC de la malnutrition aiguë). La situation déjà Sérieuse dans le district de Betroka ne connaîtra pas une amélioration en période projetée (Phase 3 de l'IPC de la malnutrition aiguë) et les cinq autres districts seront en Alerte (Phase 2 de l'IPC de la malnutrition aiguë).

8 Analyse de la vulnérabilité

L'analyse de la vulnérabilité en ressources en eau dans les Régions Atsimo Andrefana, Anosy et Androy résulte l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation de la population dans ces Régions.

8.1. Exposition

8.1.1. Description des paramètres climatiques

L'analyse des tendances pour la période 1990 à 2018 a indiqué une tendance à la baisse des précipitations. La tendance à la baisse est importante dans les parties les plus méridionales (Manambovo, Linta, Menarandra et Mandrare). En termes de saisonnalité, les précipitations de la saison estivale montrent une baisse par rapport aux précipitations de la saison hivernale. Une augmentation progressive de la température moyenne est également remarquée.

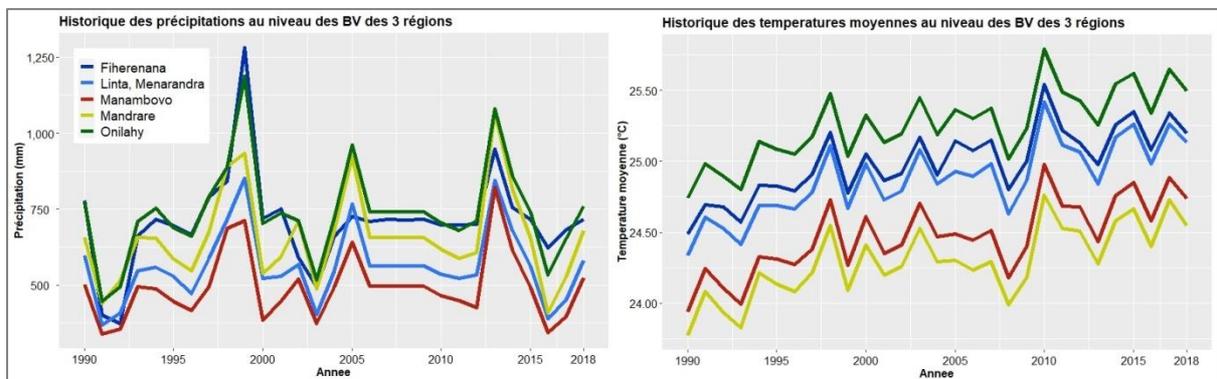


Figure 8 : Historique des précipitations et des températures moyennes dans les 3 régions

Pour les données de scénarii, en général, les précipitations diminuent de 0,5% en 2030 (RCP4.5) et de 3% 2050 (RCP4.5) ou de 4% en 2030 (RCP8.5) et de 2% 2050 (RCP8.5). Les températures minimales augmenteront entre 0,95°C et 1,75°C tandis que les maximales entre 1,25 et 1,85°C.

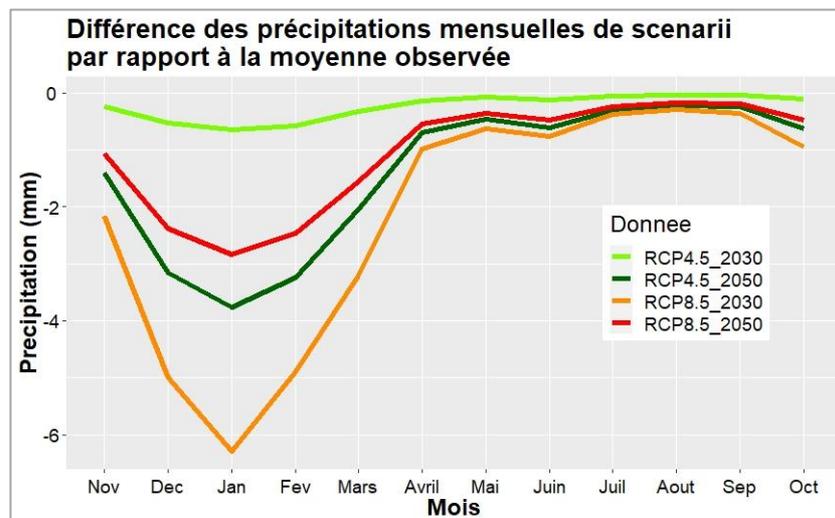


Figure 9 : Différence de précipitations mensuelles de scénarii par rapport à la moyenne observée

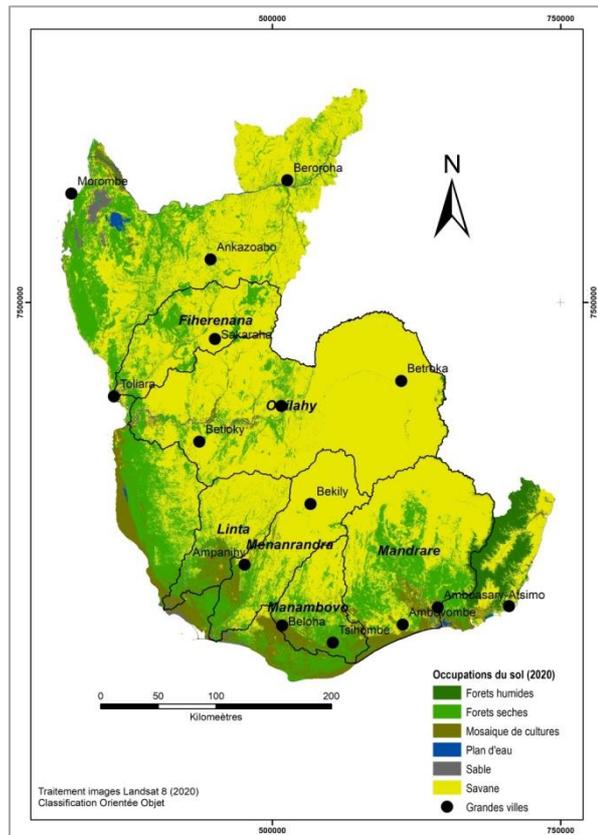
8. 1. 2. Description des paramètres biotiques : cartographie d'occupation du sol 2020

Pour la modélisation hydrologique, une carte d'occupation du sol fait partie des données input. A partir du fichier shapefile, l'occupation du sol par Bassin versant ou par région a été extraite. Du côté d'Ambovombe, une vaste superficie de mosaïques de cultures a été localisée. Cependant, cette zone spatialement agricole subit le « Tio Mena ». La zone donne l'impression d'une grande exploitation paysanne et agricole qui est contradictoire aux réalités sur terrain. Réellement, la zone classifiée de « Mosaïques de cultures » est devenue une zone presque désertique. La capacité d'infiltration en eau du sol diminue et aura un impact sur la modélisation hydrologique.



Photo 7 : Terrain anciennement agricole devenu du sable puis provoquant le « Tio-mena »

Photo prise entre Amboasary Atsimo et Ambovombe



Carte 13 : Carte d'occupation du sol (2020) des trois régions

8. 1. 3. Besoins en eau

La répartition des besoins en eau pastoral, agricole et de la population par district est présentée dans le tableau ci-après. Les détails par type de besoins (Eau utilisée par la population, eau agricole, eau pastorale) sont donnés en Annexe 9 ; 10 et 11. Les besoins en eaux agricoles sont les plus élevés et représentent plus de 95% des types de besoins.

Tableau 8 : Besoins en eau par district (Millier de m³)

Région	District	2018	2020	2030	2050
Anosy	Amboasary-Sud	489347,8	562750,1	744236,9	1301675,0
	Betroka	450581,1	518168,3	685277,6	1198554,8
Androy	Ambovombe	79989,9	91988,4	121654,7	212774,8
	Tsihombe	70800,4	81420,5	107678,6	188330,5
	Bekily	140275,7	161317,0	213341,8	373136,1
	Beloha	342010,6	393312,2	520155,3	909754,9
Atsimo Andrefana	Benenitra	37165,4	42740,2	56524,0	98860,8
	Betioky (Sud)	191773,9	220540,0	291664,2	510122,5
	Ampanihy	108820,1	125143,2	165501,8	289463,8
	Sakaraha	120411,1	138472,7	183130,2	320295,8
	Toliara I	3630,8	4175,4	5522,0	9658,0
	Toliara II	161040,5	185196,5	244922,4	428370,8
Total général		2195847,4	2525224,6	3339609,4	5840997,8

(Source. Adapté de CREAM, 2013 et de PNUD, 2010)

8. 1. 4. Offre en ressources en eaux de surface

a. Région Atsimo Andrefana

Bassin Versant Linta

La situation en eau de ruissèlement dans le bassin versant de Linta présente les résultats de la modélisation hydrologique durant la période entre 1990 et 2018, ainsi que les résultats pour les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 des années 2030 et 2050.

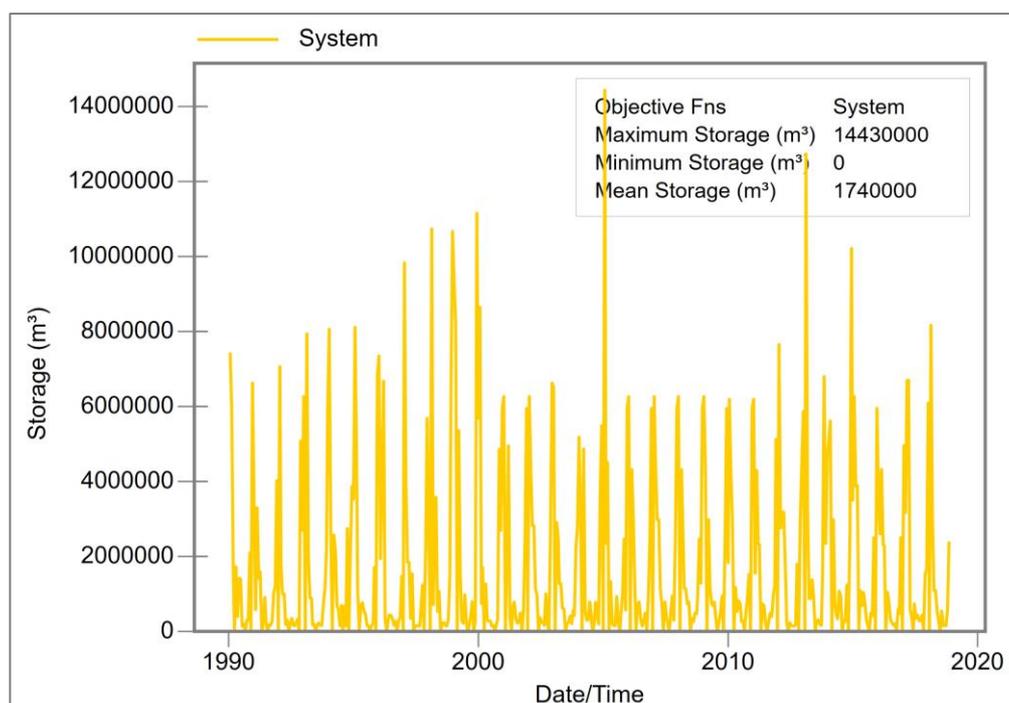


Figure 10. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Linta, 1990-2018

De 1990 à 2018, le bassin versant de Linta dispose de volume d'eau pouvant atteindre $14,43 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eau sur un mois (Janvier 2005). Le volume d'eau disponible entre Mars et Octobre diminue considérablement descendant à environ $26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Le volume d'eau de ruissèlement mensuel dans le BV de Linta présente globalement une oscillation en dent de scie avec des périodes pluvieuses entre Novembre et Mars, présentant des pics extrêmes pour les mois de Janvier et des saisons sèches entre Avril et Octobre.

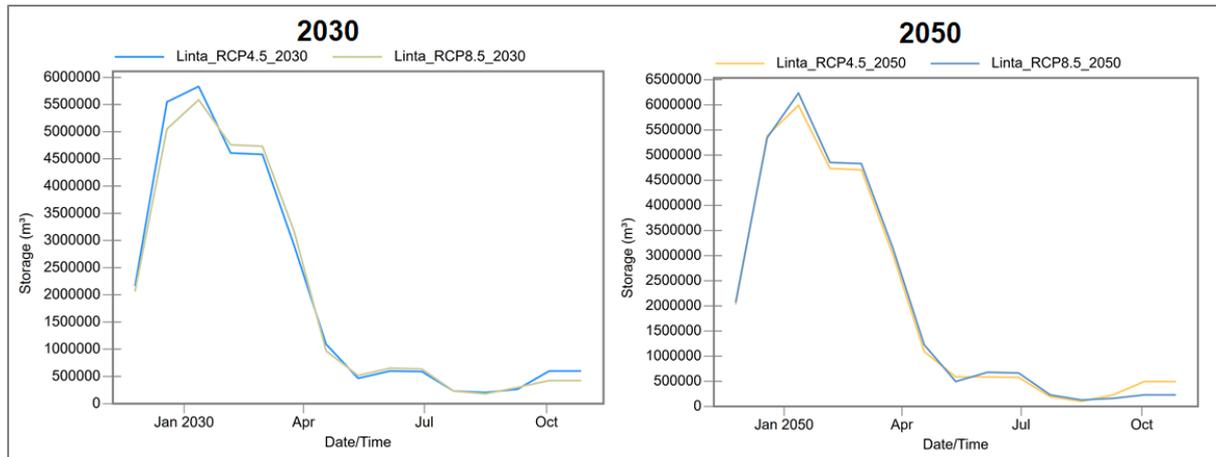


Figure 11. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Linta

Les résultats de la modélisation hydrologique des années 2030 et 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5 démontrent une similarité des tendances des 2 types de scénarii. Les débits disponibles se limitent également à la période de Novembre à Avril. Le volume d'eau disponible est faible avec un maximum de $5830 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour 2030 et de $6231 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour 2050.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

La comparaison de la ressource en eau disponible dans le bassin versant de Linta est faite par rapport aux besoins du District d'Ampanihy. Plus de la moitié de la délimitation du District d'Ampanihy correspond à la zone du bassin versant de Linta. Ces besoins sont comparés par rapport aux valeurs des volumes d'eau de ruissèlement annuels du BV de Linta.

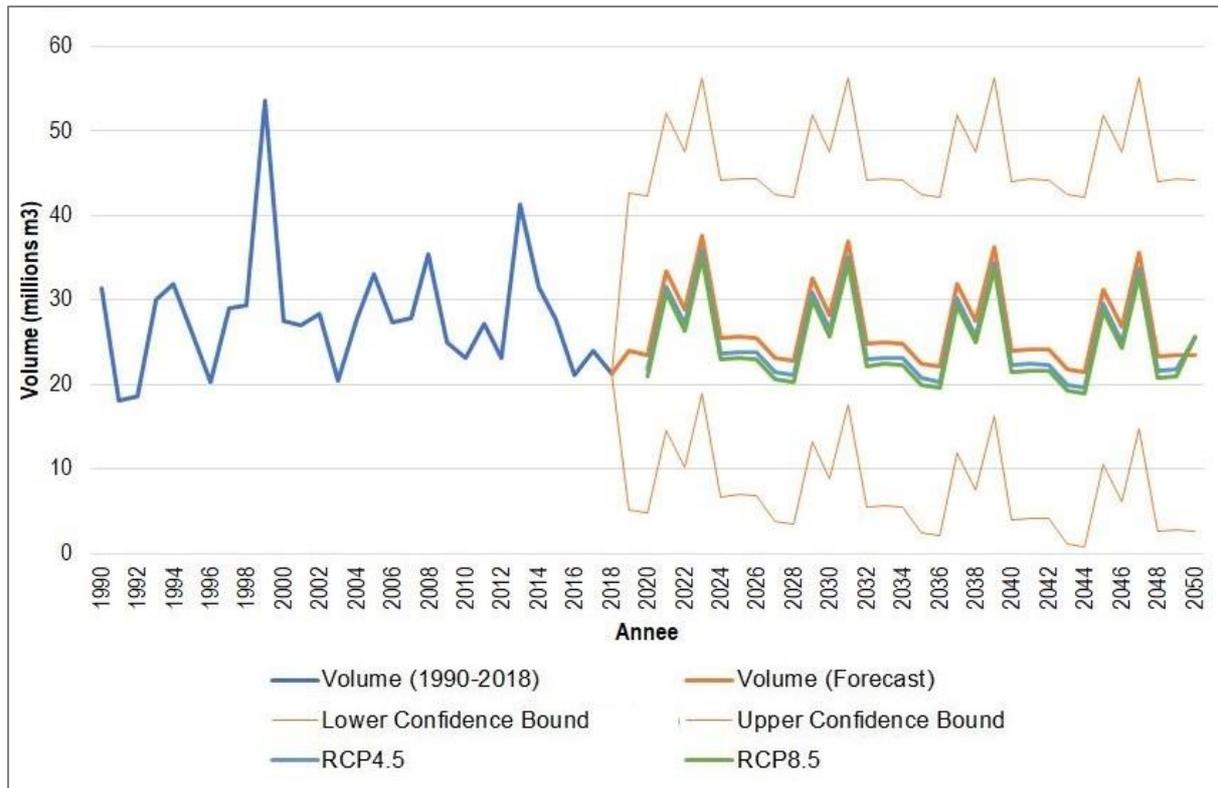


Figure 12. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Linta

L'écart de quantité d'eau requise pour répondre aux besoins en eau de la population, de l'élevage et de l'agriculture dans le District d'Ampanihy est de $24546 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour l'année 1990 et augmente jusqu'à $91319 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ en 2018. On remarque une tendance annuelle de fluctuation saisonnière des volumes de ruissèlement disponibles dans le BV de Linta. Ce cycle est estimé d'une durée de 8 ans.

Bassin versant Onilahy

Le bassin versant d'Onilahy décrit selon la modélisation présente une forme longue régulière entourant le fleuve de l'Onilahy. Les nœuds convergent dans le fleuve pour représenter les points de déversement des écoulements dans chaque sous-bassin. Le district de Betioky Atsimo, Benenitra et de Betroka font partie des zones alimentées par le bassin versant d'Onilahy.

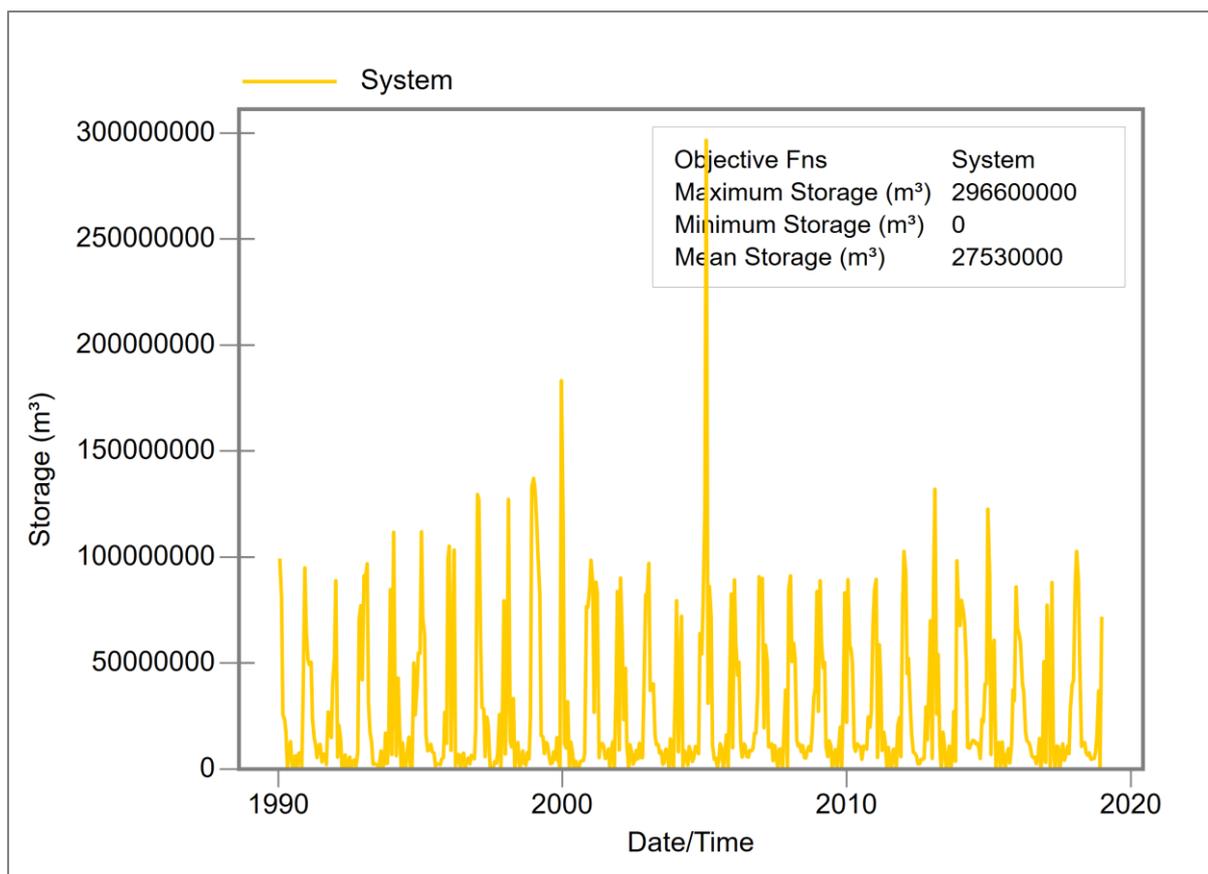


Figure 13. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Onilahy, 1990-2018

Les résultats présentent une importance de la disponibilité des eaux de ruissèlement durant la période entre Novembre et Mars. Cependant, on peut globalement identifier la présence de ruissèlement presque toute l'année entre 1990 et 2018. Un pic de volume disponible de $296.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de ruissèlement a été disponible pour l'année 2005 correspondant à la période du Cyclone Felapi. La moyenne mensuelle d'eau de ruissèlement disponible dans le BV d'Onilahy est de $27.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

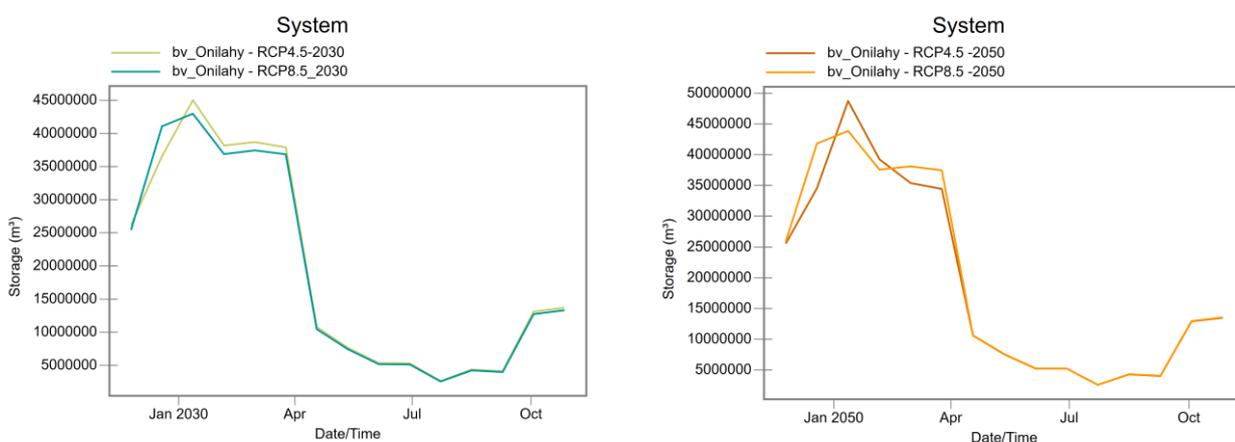


Figure 14. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Onilahy

Les tendances de volumes d'eau de ruissèlement mensuels des scenarii RCP 4.5 et 8.5 sont presque similaires pour les années 2030 et 2050. On remarque une régularité de la saison pluvieuse entre Janvier et Mars avec des valeurs plus ou moins égales durant cette période. La saison sèche entre Avril et Octobre présente une faible disponibilité en eau de ruissèlement.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

Comparaison par rapport aux Districts de Betioky Atsimo, Benenitra et de Betroka.

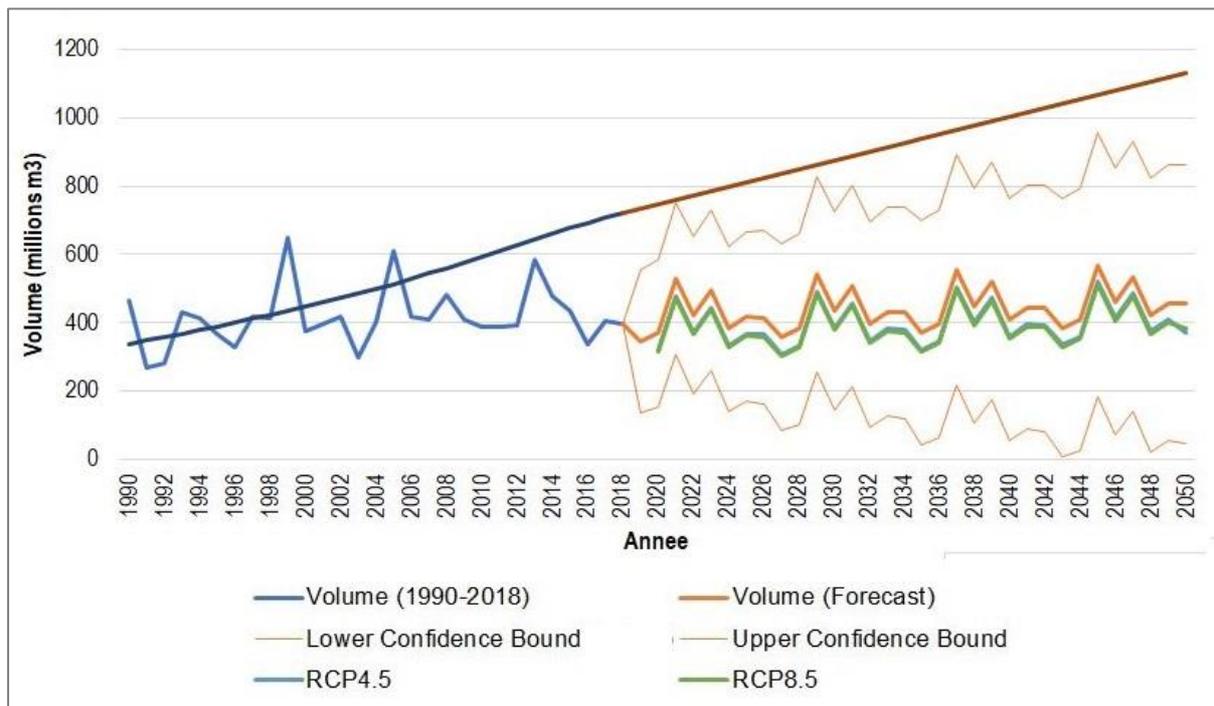


Figure 15. Graphe comparatif des besoins et des ressources disponibles, BV Onilahy

Le fleuve d'Onilahy a permis de répondre aux besoins totaux en eau entre 1990 2005. L'augmentation des besoins conduit à l'insuffisance des ressources disponibles. De ce fait, l'augmentation des écarts entre les besoins et la disponibilité en eau exploitable atteint $19 \cdot 10^6$ m³ de volume d'eau en 2018. Ce volume est encore plus important pour les années projetées de 2030, 2050 et 2080 pour atteindre $3914 \cdot 10^6$ m³ en 2080 selon le RCP 4.5. Le cycle de fluctuation des volumes d'eau disponibles pour le BV d'Onilahy est estimé se répéter tous les 8 ans.

Bassin versant Fiherenana

La modélisation du bassin versant de Fiherenana a permis d'identifier les Districts dépendant de la ressource disponible du bassin versant. Les Districts de Sakaraha, Tuléar I et II utilisent les ressources de ce bassin versant.

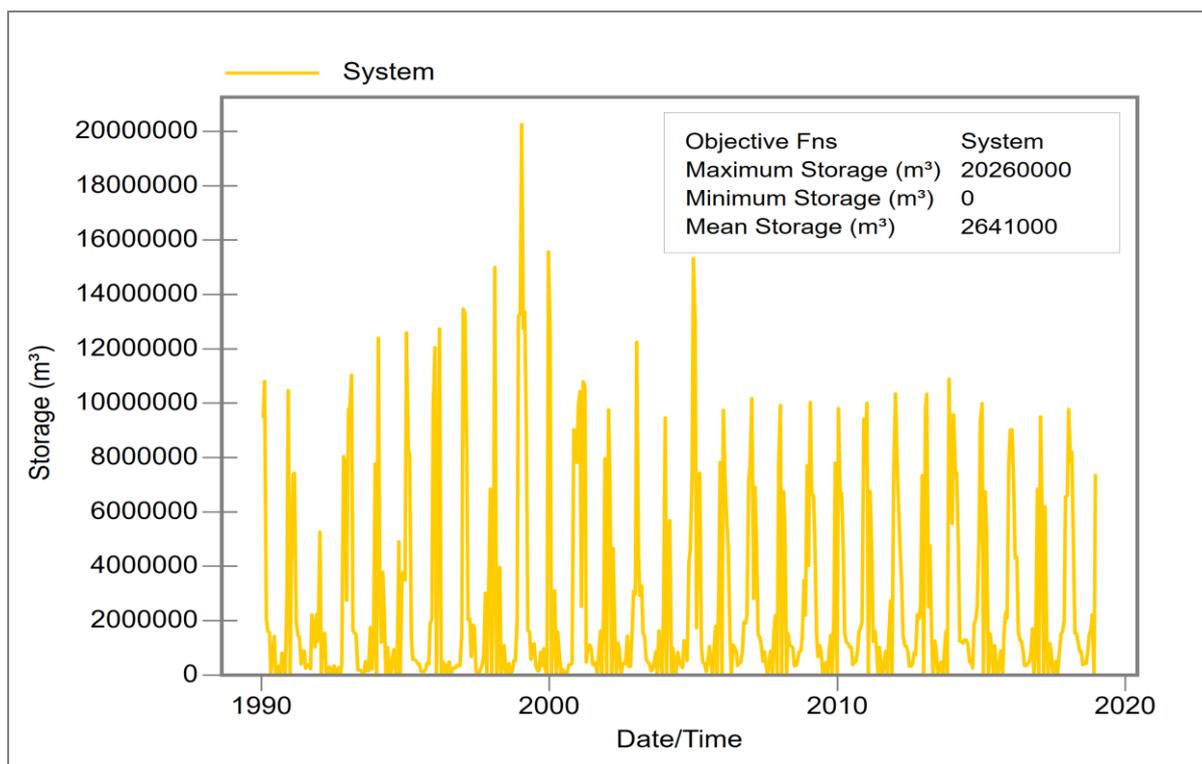


Figure 16. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Fiherenana, 1990-2018

Le bassin versant de Fiherenana produit un maximum de $20.26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en Janvier 1999. Cette période coïncide avec la venue du cyclone Alda dans la zone (firinga.com). La moyenne mensuelle entre 1990 et 2018 est de $2.653 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. On remarque une stabilité de la courbe du volume d'eau produite depuis 2005. Les pics sont irréguliers entre 1990 et 2005. Les périodes pluvieuses commencent en Novembre et se terminent en Mars. Les saisons sèches, d'Avril à Octobre présentent des valeurs presque nulles

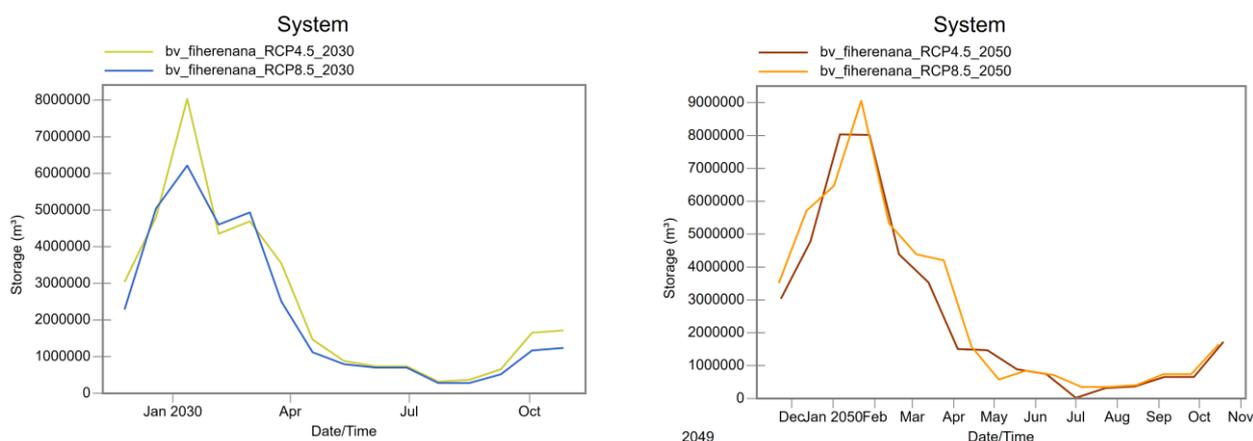


Figure 17. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Fiherenana

Les scenarii climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 ont les mêmes courbes et les volumes diminuent considérablement avec un pic de $6,731 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 2030, et de $8,256 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 2050. On remarque également que les périodes pluvieuses sont abondantes durant le mois de Janvier et

décroit plus rapidement en 2050. On retrouve une proportion plus régulière des eaux de ruissèlement pour l'année 2030 entre Novembre et Mars.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

La comparaison des volumes d'eau de ruissèlement disponibles dans le bassin versant de Fiherenana est faite par rapport aux besoins des Districts de Sakaraha, Toliary I et II. Ces derniers sont représentés par les besoins totaux (population, élevage et agriculture) ainsi que les besoins de la population.

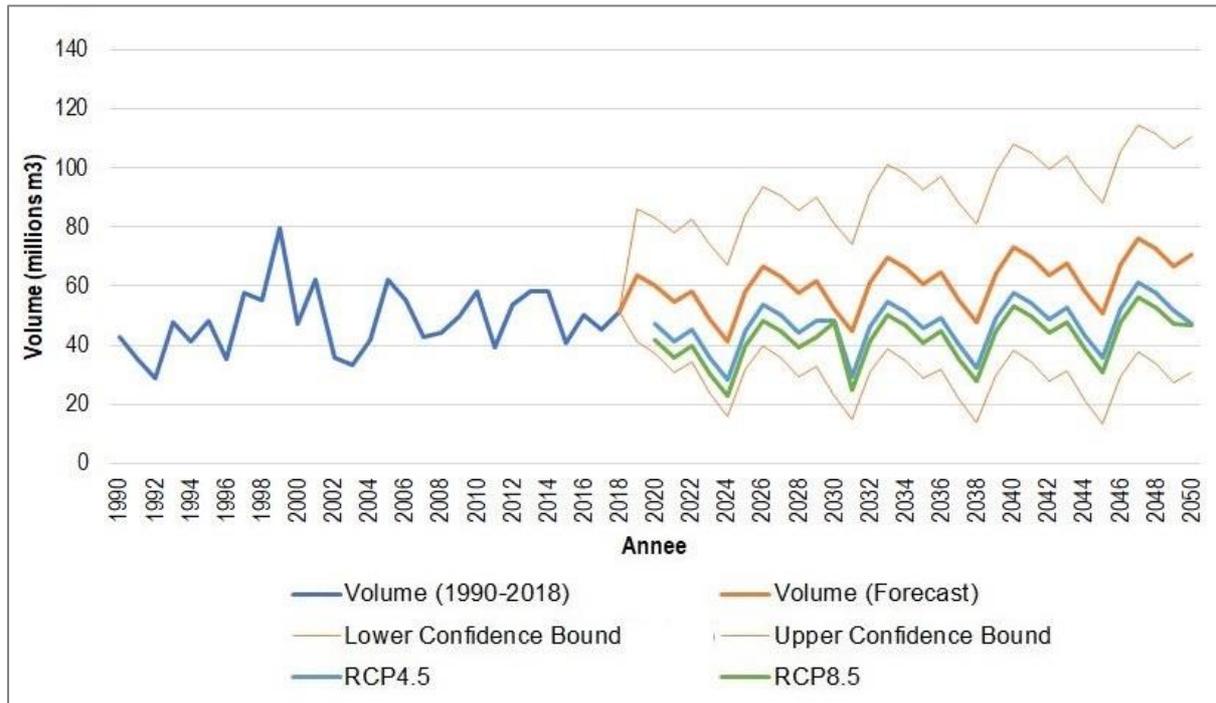


Figure 18. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Fiherenana

La comparaison de la période actuelle entre 1990 et 2018 présente un déficit de plus de 10 millions de m³ d'eau entre les volumes d'eau disponibles et les besoins totaux. Les résultats par rapport aux scénarii climatiques décrivent une augmentation considérable des besoins en eau totaux. Les volumes d'eau disponibles entre 1990 et 2018 montrent des tendances de fluctuation de fréquence de 8 ans.

b. Région Anosy

Bassin versant Mandrare

Le bassin versant de Mandrare traverse les Districts d'Amboasary Atsimo et d'Ambovombe. Le profil topographique de ce bassin versant indique la présence de forte pente au niveau du fleuve.

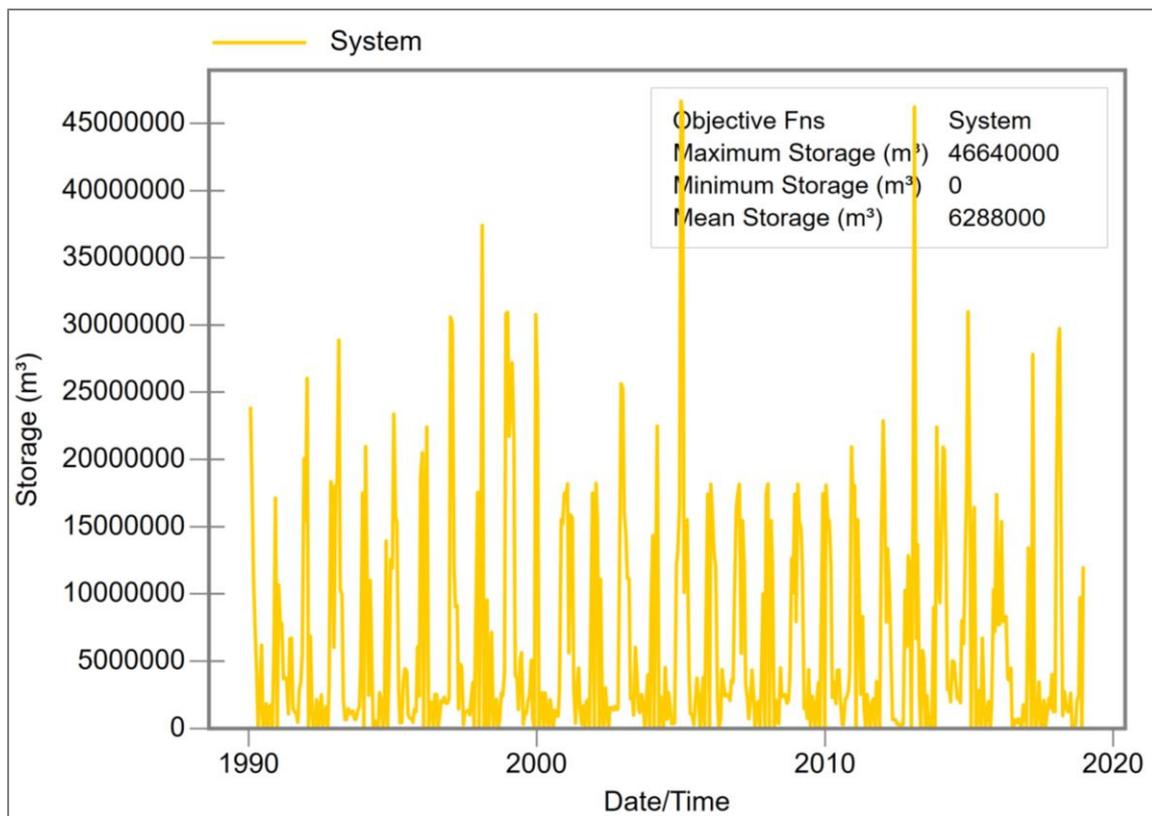


Figure 19. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Mandrare, 1990-2018

L'analyse hydrologique du bassin versant de Mandrare indique 2 pics de volumes entre 1990 et 2018. Le premier pic de 2005 correspond à l'arrivée du cyclone Gafilo et celui de 2013 au cyclone Haruna. En moyenne, le bassin versant de Mandrare dispose de $6,288 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de volume de ruissèlement mensuel disponible. Cependant, le volume d'eau entre Avril et Octobre est faible voire nul.

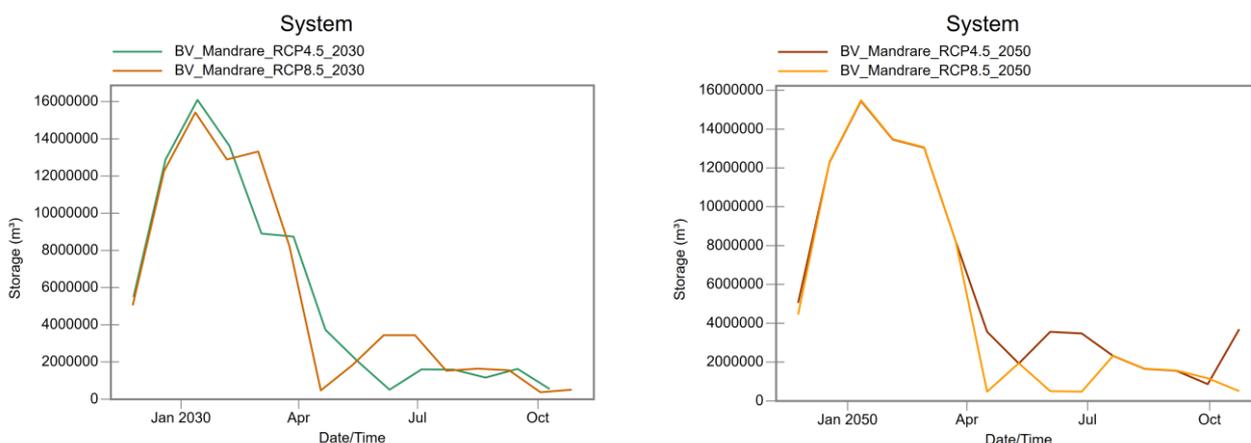


Figure 20. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Mandrare

Les volumes de ruissèlement des scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5 sont similaires pour les années de référence 2030 et 2050. Les périodes de pluie vont de Novembre à Avril. Et l'on remarque une présence de période pluvieuse également durant les mois de Mai et de Juillet.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

Les besoins des Districts d'Amboasary Atsimo et d'Ambovombe Androy en termes de besoins de la population, d'élevage et d'agriculture sont comparés avec les ressources en eau disponibles dans le bassin versant de Mandrare.

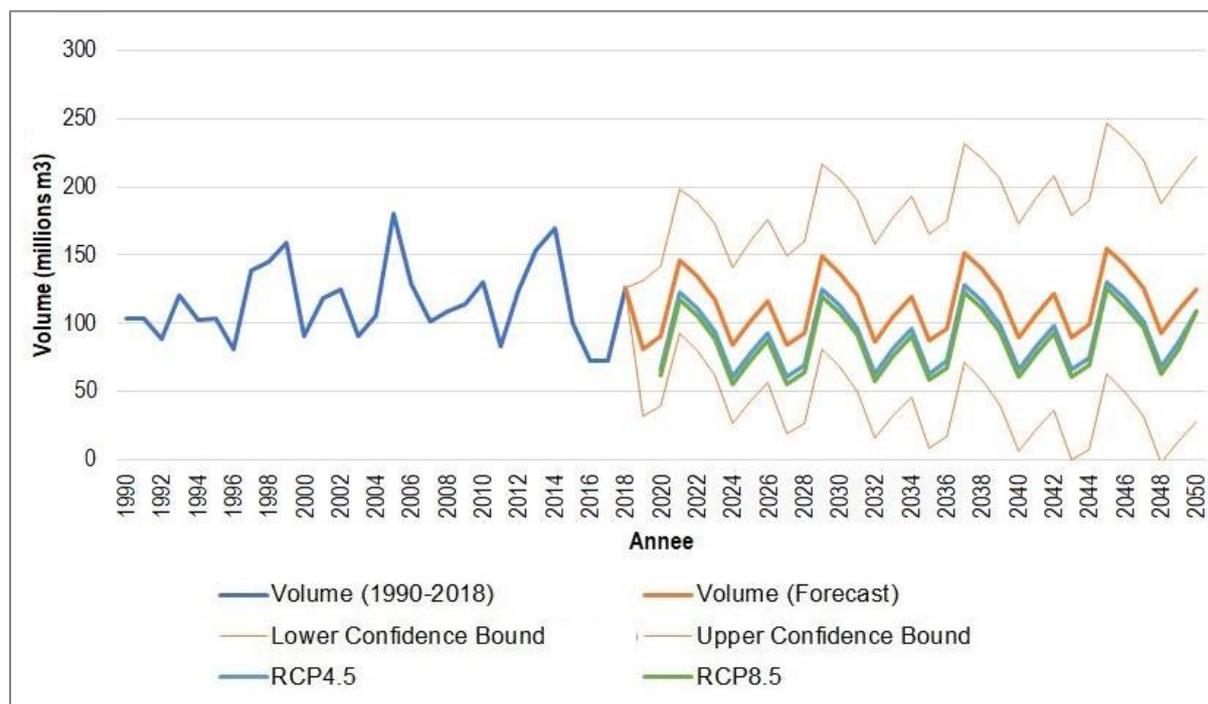


Figure 21. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Mandrare

Les besoins totaux annuels en eau des 2 Districts entre 1990 et 2018 sont supérieurs à la quantité d'eau disponible au niveau du bassin versant de Mandrare. L'écart non couvert est de plus de 60% du volume des besoins totaux. Les résultats de comparaison pour les scénarii futurs RCP 4.5 et RCP 8.5 pour les années démontrent une nette augmentation des écarts entre les besoins et les quantités disponibles.

Bassin versant Manambovo

Le volume de ruissèlement mensuel par conduite est présenté dans les résultats de la modélisation de la période entre 1990 et 2018. La pente du profil topographique du bassin de Manambovo décrit une pente moyenne uniforme du cours d'eau.

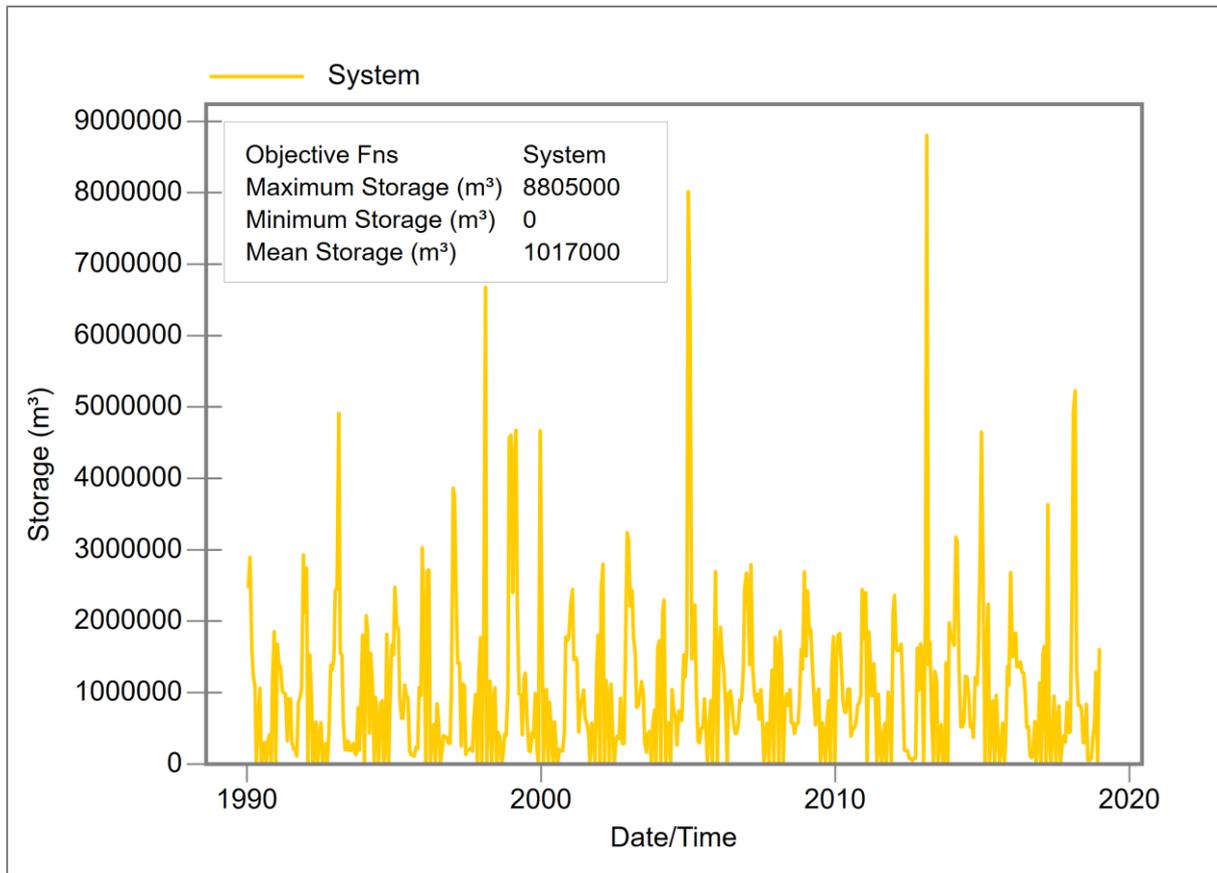


Figure 22 Volume d'eau de ruissèlement mensuel, BV Manambovo, 1990-2018

Le volume de ruissèlement du bassin versant de Manambovo présente de nombreux pics dont le maximum est en 2013, correspondant au cyclone Haruna. Le volume mensuel maximal de ruissèlement est de $8,805 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour le mois de Janvier 2003. Le volume d'eau de ruissèlement de ce bassin versant entre 1990 et 2018 est très faible durant la saison sèche d'Avril à Octobre.

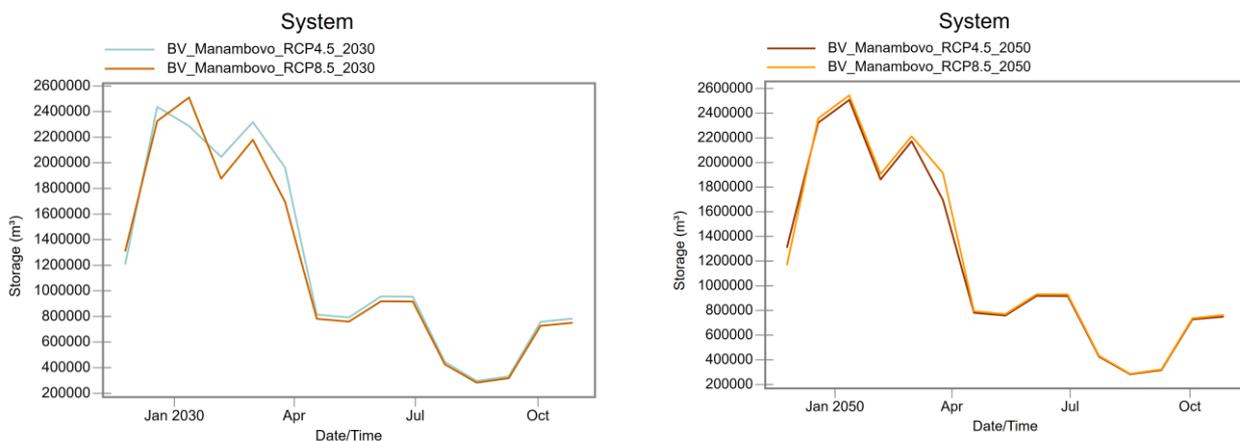


Figure 23. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Manambovo

Les projections des scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5 en eau de ruissèlement présentent des valeurs similaires pour les années de référence 2030 et 2050. On remarque une égale répartition des pluies entre Novembre et Avril. Entre Mai et Juillet, on peut également remarquer la présence de pluie jusqu'au mois de Septembre.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

La comparaison de la quantité de ruissèlement disponible dans le bassin versant est faite par rapport aux besoins des Districts de Beloha et de Tsihombe.

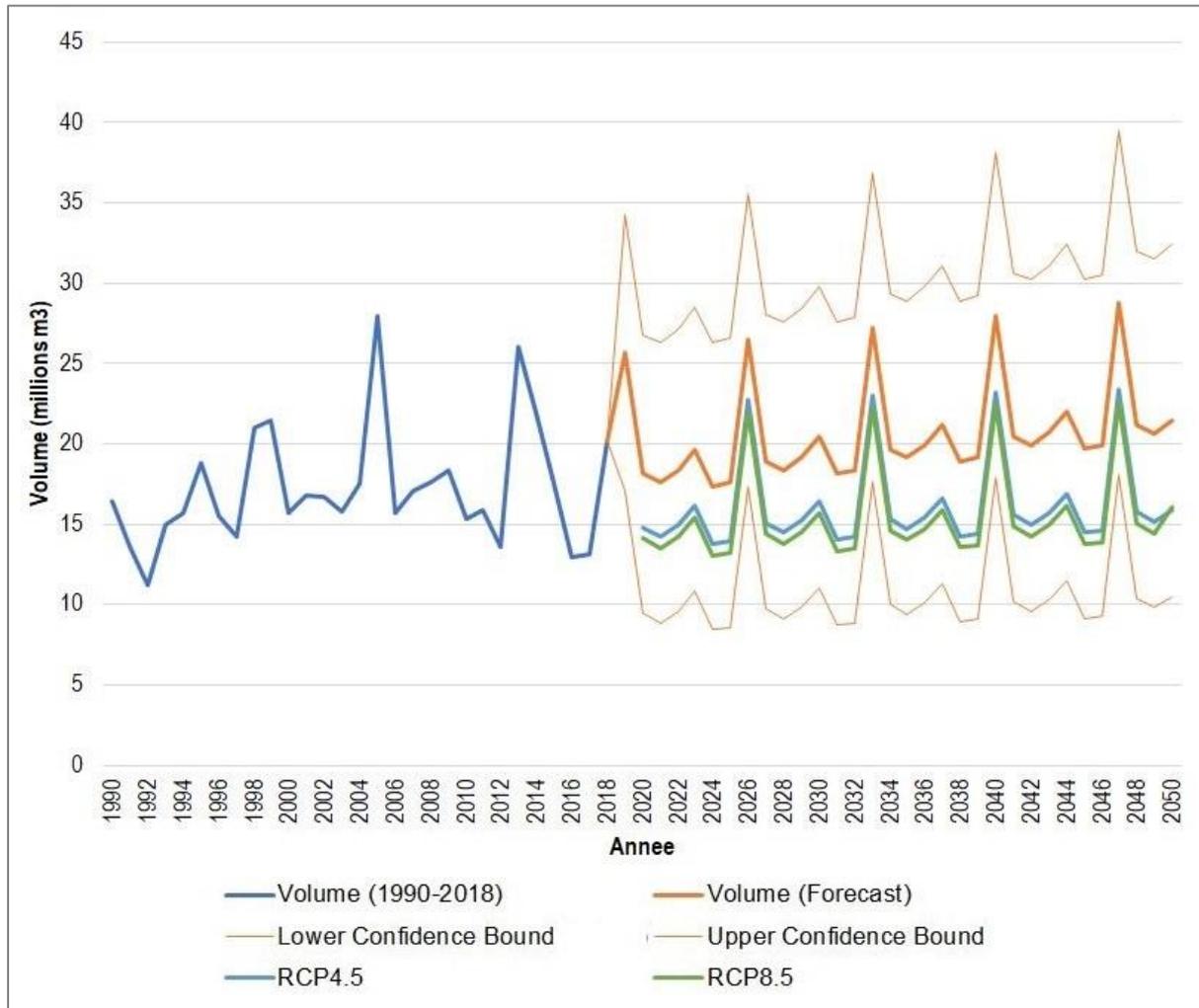


Figure 24. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Manambovo

Les besoins totaux en eau au niveau des Districts de Tsihombe et de Beloha ne sont pas satisfaits entre 1990 et 2018 et de même pour les années de référence 2030 et 2050 pour les scénarii RCP 4.5 et 8.5. Le cycle saisonnier de 7 ans dans ce BV présente une similitude entre les tendances passées et les tendances à venir. L'année 2030 correspond à une phase constante des volumes avec une faible croissance. Tandis que, 2050 sera une phase de reprise après un pic de déclin de la quantité d'eau disponible dans cette zone.

c. Région Androy

Bassin versant de Menarandra

Le bassin versant de Menarandra est caractérisé par le fleuve Menarandra traversant le District de Bekily et se déverse dans la mer vers le sud de Madagascar.

La quantité de pluie mensuelle entre 1990 et 2018 génère un volume de ruissèlement disponible dans le système au niveau des différentes conduites représentant le cours d'eau. Les débits d'eau produite pour les scenarii futurs RCP 4.5 et RCP 8.5 sont comparés dans les graphes suivants.

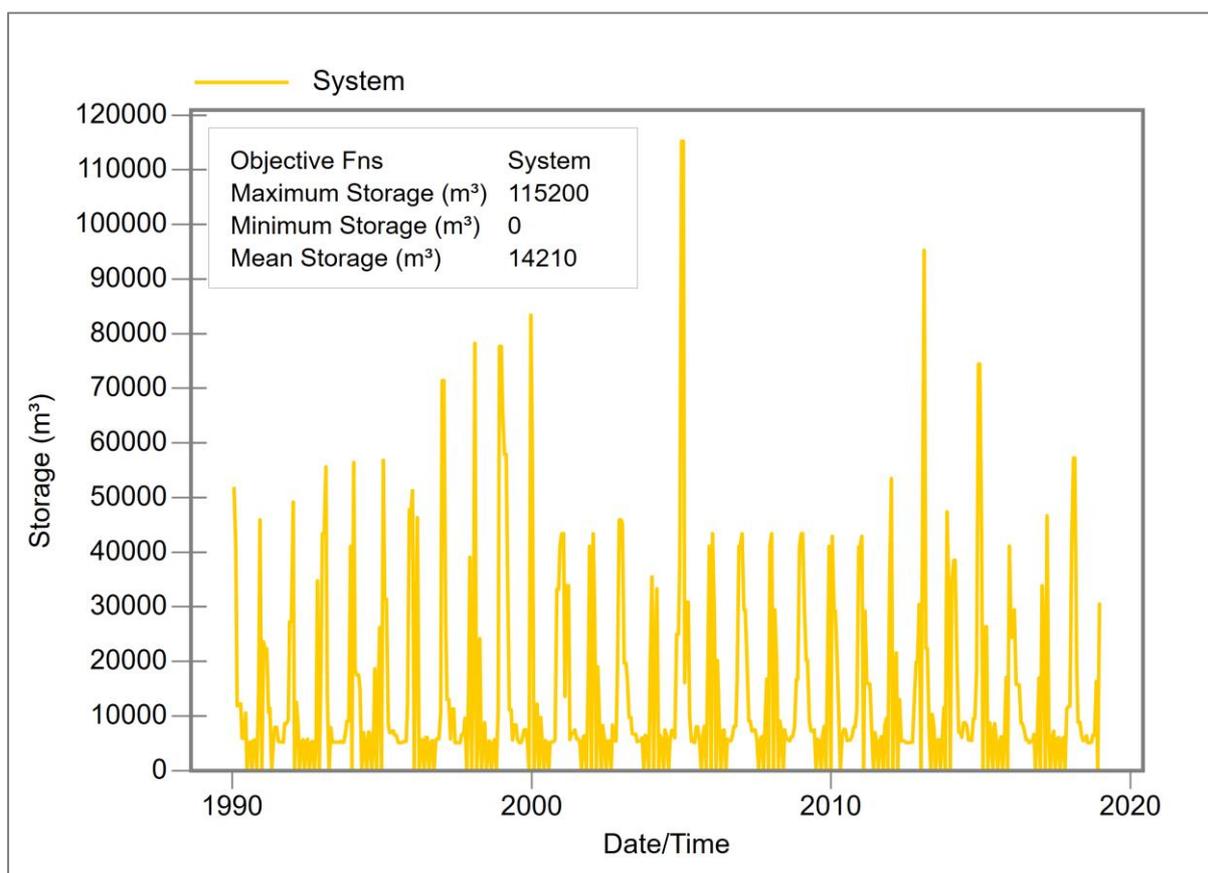


Figure 25. Volume d'eau de ruissèlement disponible mensuel, BV Menarandra, 1990-2018

Le volume de ruissèlement mensuel est très faible. La quantité maximale d'eau disponible dans le bassin est de 115,2 milliers de m³ en Janvier 2005. Les moyennes de ruissèlement mensuelles pour le bassin versant de Menarandra ont une valeur de 24,87 milliers de m³.

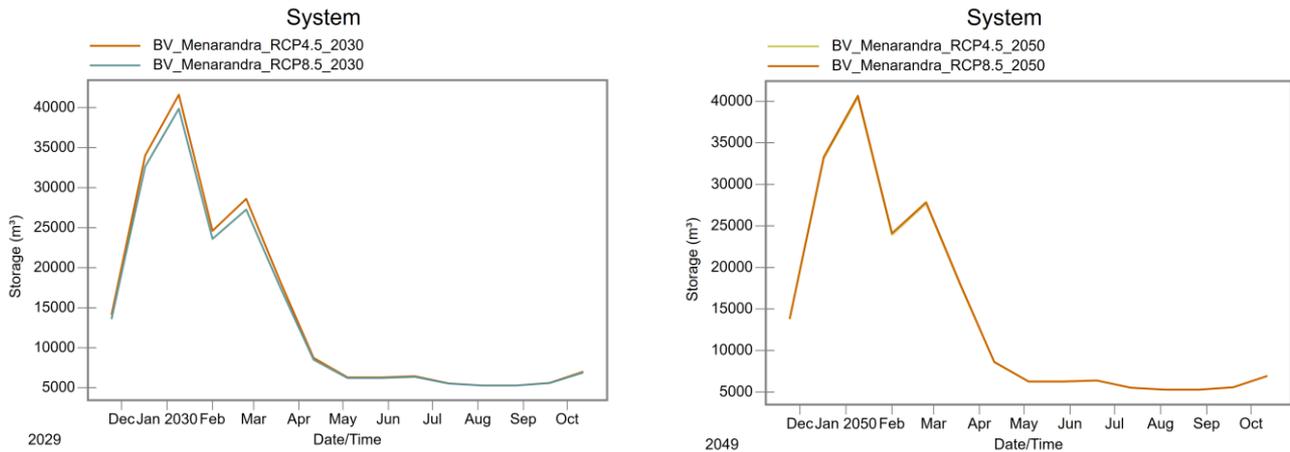


Figure 26. Volume de ruissèlement mensuel, RCP 4.5-8.5, 2030 et 2050, BV Menarandra

Les valeurs des volumes d’eaux de ruissèlement disponibles pour les années 2030 et 2050 sont similaires pour les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5. On remarque un pic de volume durant le mois de Janvier. La répartition des volumes disponibles est quasiment régulière entre Novembre et Mars. La période sèche entre Avril et Octobre pour les années futures 2030, 2050 présente une quantité d’eau faible malgré la continuité de l’écoulement selon la modélisation.

Comparaison des besoins et des ressources en eau disponibles

La comparaison a été faite entre les volumes d’eaux disponibles par rapport aux besoins du District de Bekily.

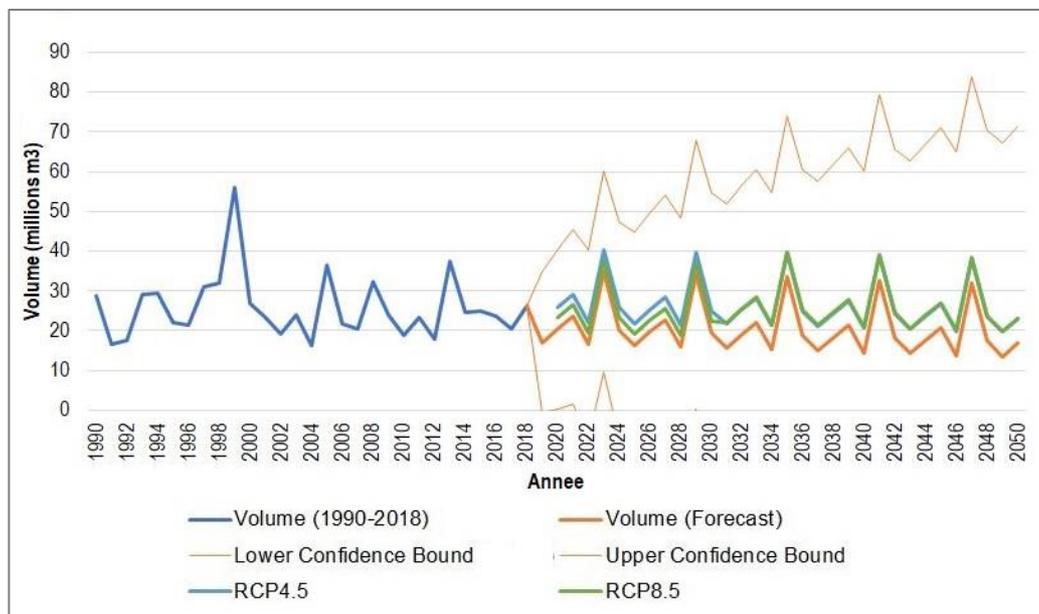


Figure 27. Ressources en eau disponible au niveau du BV de Menarandra

Les besoins totaux en eau au niveau du bassin versant de Menarandra sont très élevés et ne sont pas couverts par les eaux d’écoulement. L’apport en eau d’écoulement à partir de ce bassin versant est marginal par rapport aux besoins totaux.

Récapitulatif des volumes d'eau de ruissèlement disponibles

La moyenne des valeurs d'eau disponibles dans les bassins versant entre 1990 et 2018 est comparée avec les valeurs des volumes d'eau disponibles pour les scénarii climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 pour les périodes 2030 et 2050.

Table 1. Comparaison des volumes moyens observés avec les volumes des scénarii climatiques

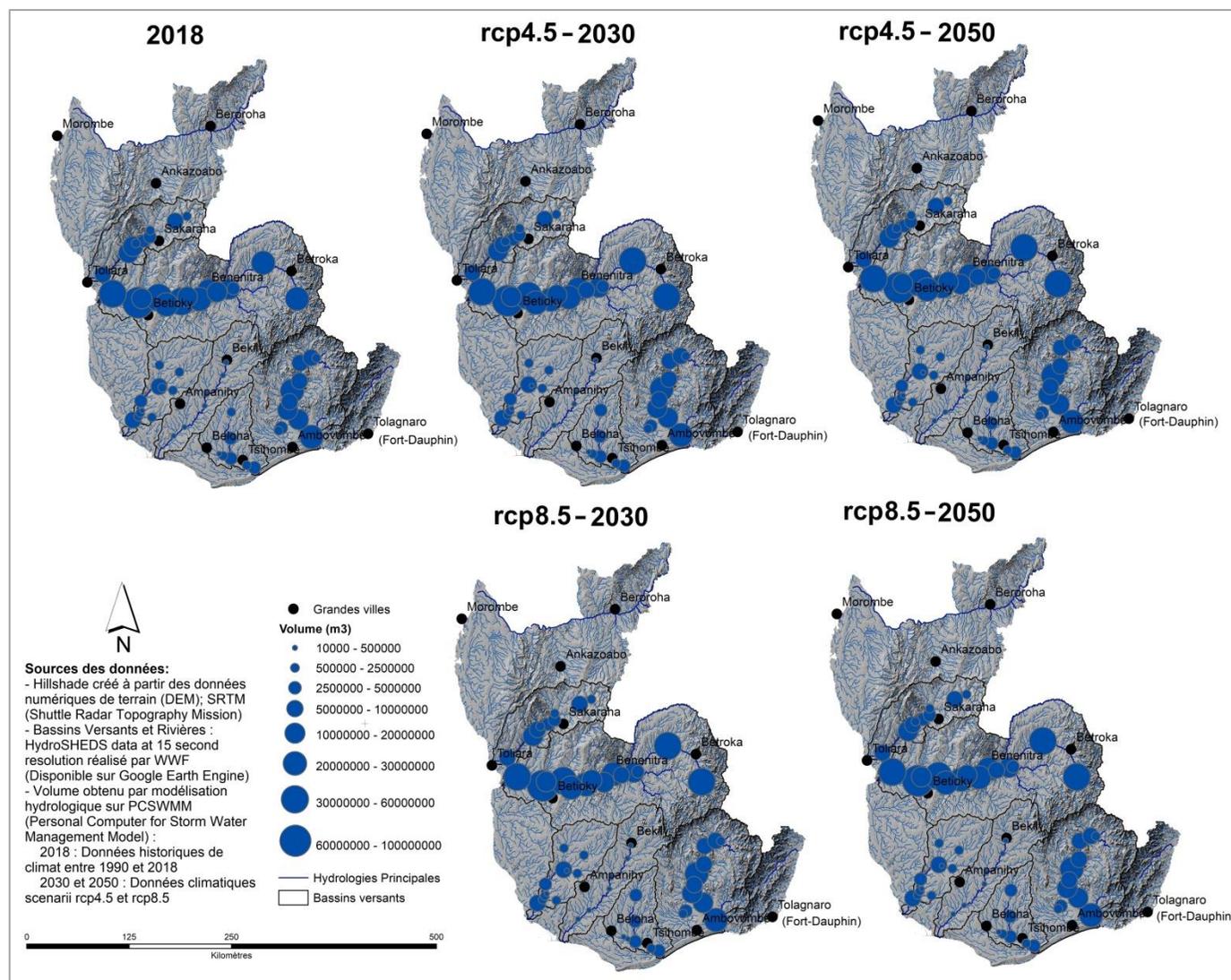
Bassin Versant	Moyenne observée	2030_RCP4.5	%	2030_RCP8.5	%	2050_RCP4.5	%	2050_RCP8.5	%
Fiherenana	48.382.662	48.367.377	-0,03	47.690.935	-1,43	47.368.062	-2,10	46.543.954	-3,80
Linta	27.867.104	26.417.425	-5,20	25.640.580	-7,99	25.450.147	-8,67	25.614.147	-8,08
Manambovo	17.195.540	16.411.474	-4,56	15.690.342	-8,75	15.917.661	-7,43	16.027.675	-6,79
Mandrare	115.096.923	113.134.823	-1,70	107.992.691	-6,17	108.322.860	-5,89	108.653.877	-5,60
Menarandra	25.728.731	25.083.605	-2,51	22.476.172	-12,64	22.994.626	-10,63	23.157.788	-9,99
Onilahy	415.998.014	385.941.602	-7,23	379.528.899	-8,77	370.060.214	-11,04	384.139.321	-7,66
Total	650.268.974	615.356.305	-5,37	599.019.618	-7,88	590.113.570	-9,25	604.136.762	-7,09

Les volumes d'eau disponibles pour les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 diminuent par rapport aux valeurs des volumes moyennes observées entre 1990 et 2018 dans les BV des 3 Régions du Sud de Madagascar. Pour les scénarii climatiques RCP 4.5 en 2030, le BV d'Onilahy présente un maximum de diminution des volumes disponibles avec 7.23% de diminution et globalement, une moyenne de 5.37% de diminution. En 2050, les scénarii climatiques RCP 4.5 présentent des diminutions d'une moyenne de 9.25% avec Onilahy comme BV ayant le maximum de diminution de l'ordre de 11.04%. Pour les scénarii RCP 8.5, en moyenne, la baisse du volume d'eau disponible est de 7.88% en 2030 et de 7.09% en 2050. Le BV de Menarandra est le plus touché par cette baisse avec 12.64% de baisse en 2030 et 10% en 2050.

Le changement climatique influe dans cette tendance de baisse des volumes d'eau disponibles dans le futur à moyen terme. La diminution de la quantité d'eau de pluie, ainsi que l'augmentation de la température dans ces régions impliquent la diminution des volumes de ruissèlement et l'augmentation de l'évapotranspiration.

Disponibilité des eaux de ruissèlement selon les sous-bassins versants dans les 3 Régions

La modélisation hydrologique a permis d'identifier les volumes d'eau disponibles selon les sous-bassins versants. Ainsi, les volumes d'eau de ruissèlement tout le long des cours d'eau principaux des bassins versants identifiés dans l'étude sont représentés géographiquement.



Carte 14. Répartition spatiale de la disponibilité en eau de ruissèlement par bassin versant, moyenne annuelle

En général, les moyennes annuelles des volumes d'eau disponibles dans le passé sont supérieures aux tendances pour les années 2030 et 2050. Les volumes d'eau disponibles au niveau des conduites du fleuve d'Onilahy sont largement supérieurs à ceux des autres fleuves. Le fleuve de Menarandra possède le plus faible volume d'eau de ruissèlement disponible.

Taux de réponse des besoins selon les bassins versants

La réponse des besoins totaux des zones administratives incluant les bassins versants par rapport aux eaux de surface disponibles reste très faible dans la zone sud de Madagascar. Les valeurs des taux de réponse des besoins varient entre 73.71% (BV Onilahy) et 0.06% (BV Menarandra). Cependant, on remarque qu'en moyenne, ce taux est de l'ordre 29.4% pour les valeurs actuelles, de 10.9% pour les scénarii RCP4.5 et de 6.9% pour les scénarii RCP 8.5.

Tableau 9. Récapitulatif des taux de réponse des besoins par rapport à l'offre

Bassin Versant	Région	District	Taux de réponse des besoins par rapport à l'offre						
			Moyenne observée	Actuel		RCP 4,5		RCP 8,5	
				2018	2030	2050	2030	2050	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Sakaraha	19,45%	20,58%	15,88%	15,55%	15,66%	15,28%	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara I	19,45%	20,58%	15,88%	15,55%	15,66%	15,28%	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara II	19,45%	20,58%	15,88%	15,55%	15,66%	15,28%	
Linta	Atsimo Andrefana	Ampanihy	24,13%	18,47%	18,83%	14,03%	18,28%	14,12%	
Manambovo	Androy	Tsihombe	11,55%	13,56%	9,08%	6,81%	8,68%	6,85%	
Manambovo	Androy	Beloha	11,55%	13,56%	9,08%	6,81%	8,68%	6,85%	
Mandrare	Anosy	Amboasary-Sud	19,05%	20,79%	15,41%	11,41%	14,71%	11,45%	
Mandrare	Androy	Ambvombe	19,05%	20,79%	15,41%	11,41%	14,71%	11,45%	
Menarandra	Androy	Bekily	17,28%	17,62%	13,87%	12,72%	12,43%	12,81%	
Onilahy	Anosy	Betroka	57,69%	55,19%	44,06%	32,67%	43,33%	33,91%	
Onilahy	Atsimo Andrefana	Benenitra	57,69%	55,19%	44,06%	32,67%	43,33%	33,91%	
Onilahy	Atsimo Andrefana	Betioky (Sud)	57,69%	55,19%	44,06%	32,67%	43,33%	33,91%	

(Source. Auteurs)

8. 1. 5. Tendance et saisonnalité du climat dans les 3 Régions du Sud

La modélisation hydrologique des bassins versants dans les 3 Régions du Sud de Madagascar a permis d'identifier une saisonnalité des moyennes annuelles des eaux de ruissèlement. Les graphes représentant les volumes d'eau de ruissèlement dans les 6 bassins versants présentent des saisonnalités entre 7 et 8 ans. Ceci est représenté par les tendances futures entre 2018 et 2050. Les valeurs annuelles des climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 sont également représentées. Cette saisonnalité se traduit par un pic d'augmentation de la disponibilité d'eau de ruissèlement sur 1 ou 2 ans. Puis une décroissance sur 3 ans. Suivi d'une légère augmentation sur 2 ans et un déclin vers un minimum sur l'année suivante. On note globalement une

similitude des valeurs annuelles pour les 2 scénarii. De plus, les valeurs pour les années 2050 sont globalement élevées par rapport à celles des années 2030. L'explication réside dans la tendance des volumes d'eau de ruissèlement décroissante dans la période de 2030 et croissante dans la période de 2050.

8. 1. 6. Notation de l'exposition

Les District de Tsihombe et Beloha sont les plus touchés par l'insuffisance en eau disponible face aux besoins de la population de ces Districts. Les Districts de Benenitra, Betioky Sud et de Betroka alimentés par le bassin d'Onilahy sont les plus optimistes avec une capacité importante de réponse des besoins pour les années passées et futures. Pour les scénarii climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5, la réponse des besoins en eau décroît pour les périodes 2030 et 2050

Tableau 10 Tableau récapitulatif des notations de l'exposition des Districts

Bassin Versant	Région	District	Notation de l'exposition						
			Moyenne observée	Actuel		RCP 4.5		RCP 8.5	
				2018	2030	2050	2030	2050	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Sakaraha	1,94	2,06	1,59	1,56	1,57	1,53	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara I	1,94	2,06	1,59	1,56	1,57	1,53	
Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara II	1,94	2,06	1,59	1,56	1,57	1,53	
Linta	Atsimo Andrefana	Ampanihy	2,41	1,85	1,88	1,40	1,83	1,41	
Manambovo	Androy	Tsihombe	1,16	1,36	0,91	0,68	0,87	0,69	
Manambovo	Androy	Beloha	1,16	1,36	0,91	0,68	0,87	0,69	
Mandrare	Anosy	Amboasary-Sud	1,90	2,08	1,54	1,14	1,47	1,14	
Mandrare	Androy	Ambovombe	1,90	2,08	1,54	1,14	1,47	1,14	
Menarandra	Androy	Bekily	1,73	1,76	1,39	1,27	1,24	1,28	
Onilahy	Anosy	Betroka	5,77	5,52	4,41	3,27	4,33	3,39	
Onilahy	Atsimo Andrefana	Benenitra	5,77	5,52	4,41	3,27	4,33	3,39	
Onilahy	Atsimo Andrefana	Betioky (Sud)	5,77	5,52	4,41	3,27	4,33	3,39	

(Source. Auteurs)

La notation de l'exposition des Districts face au changement climatique a permis de montrer que le District de Tsihombe et de Beloha sont les plus exposés au changement climatique, avec une note de 1.16 sur 10 selon les valeurs par rapport aux moyennes observées. Les Districts de Betioky (Sud), Benenitra et Betroka sont les moins exposés. Pour 2030, la diminution d

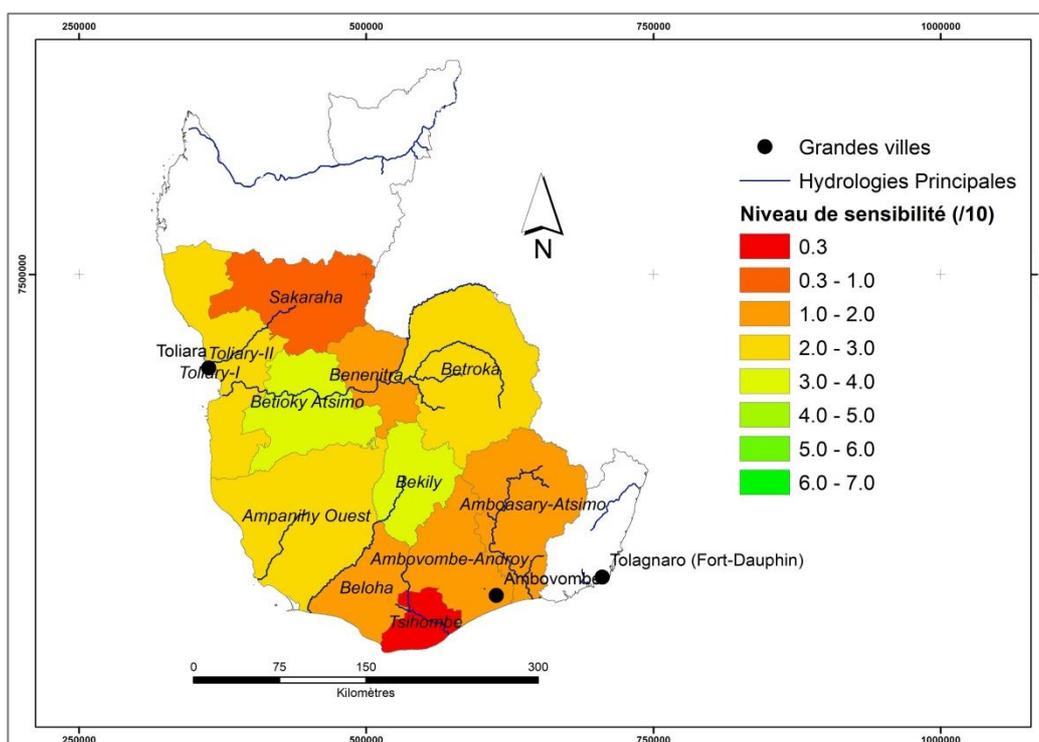
8. 2. Sensibilité (Taux d'accès à l'eau potable)

La population dans le Grand Sud de Madagascar souffre encore d'un faible taux d'accès à l'eau potable. L'accès à l'eau potable dans le Sud peut être classé par District avec le nombre de Communes présent.

Tableau 11. Score de la sensibilité

Bassin versant	District	Nombre de communes	Total population	Taux d'accès à l'eau potable (%)	Score
Fiherenana	Sakaraha	12	113 119	8,27	0,83
Fiherenana	Toliara I	1	226 473	69,67	6,97
Fiherenana	Toliara II	26	422 603	25,57	2,56
Linta	Ampanihy Ouest	19	477 368	21,02	2,10
Menarandra	Bekily	20	341 449	39,57	3,96
Manambovo	Beloha	8	246 903	12,11	1,21
Manambovo	Tsihombe	9	471 298	3,30	0,33
Mandrare	Ambovombe	21	668 861	10,31	1,03
Mandrare	Amboasary Sud	17	343 456	14,98	1,50
Onilahy	Betroka	22	267 156	22,78	2,28
Onilahy	Benenitra	6	45 229	14,95	1,50
Onilahy	Betioky Sud	30	363 856	30,18	3,02

(Source. Auteurs)



Carte 15. Indice de sensibilité à l'eau au niveau des trois régions

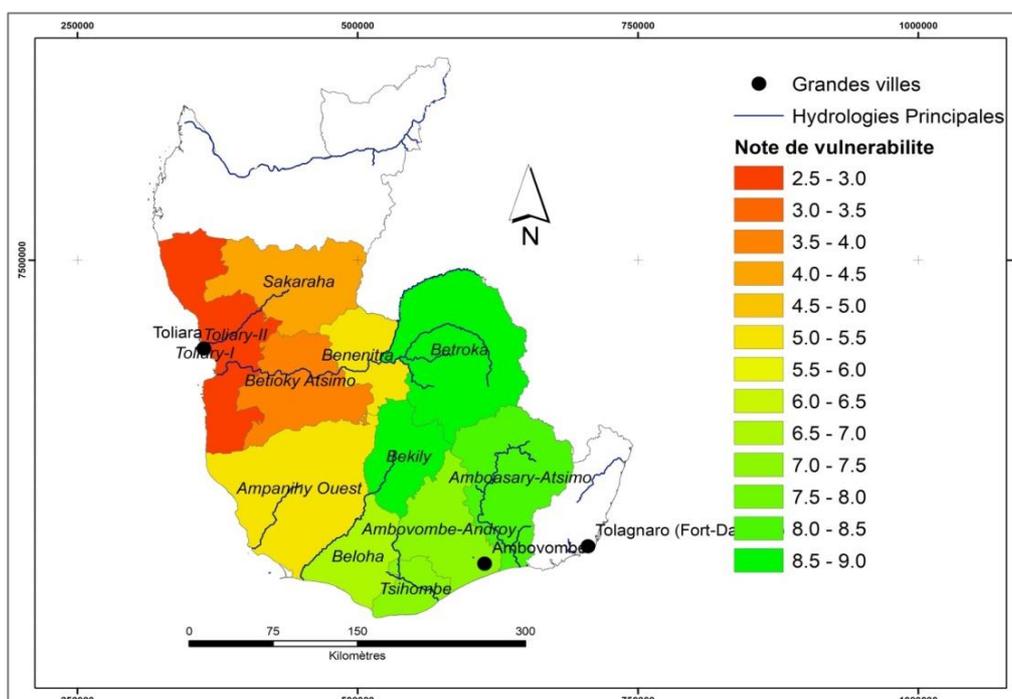
8.3. Capacité d'adaptation (Eaux souterraines)

Les districts de Betroka, de Bekily et d'Amboasary Atsimo ont une capacité d'adaptation élevée par rapport aux autres districts. La profondeur d'ouvrage dans le district de Tsihombe est acceptable (note moyenne de 9.59) mais la qualité de la nappe n'est pas bonne. De même pour le District d'Ambovombe, de Beloha et d'Ampanihy Ouest. Pour les autres districts, ni la profondeur de la nappe, ni la qualité de la nappe n'ont pas obtenu la moyenne.

Tableau 12. Score de la capacité d'adaptation

Bassin Versant	District	Profondeur de la nappe	Qualité de la nappe	Cumulée
Fiherenana	Sakaraha	1,76	7,17	4,47
Fiherenana	Toliary-II	1,61	4,38	2,99
Fiherenana	Toliary-I	1,98	3,97	2,97
Linta	Ampanihy Ouest	5,18	6,38	5,78
Menarandra	Bekily	7,97	9,85	8,91
Manambovo	Tsihombe	9,59	5,10	7,35
Manambovo	Beloha	8,15	5,32	6,73
Mandrare	Amboasary-Atsimo	7,32	8,93	8,12
Mandrare	Ambovombe	7,29	6,99	7,14
Onilahy	Betroka	7,97	9,96	8,96
Onilahy	Benenitra	3,17	7,18	5,18
Onilahy	Betioky Atsimo	1,81	5,39	3,60

(Source. Auteurs)



Carte 16 : Indice de capacité d'adaptation par district

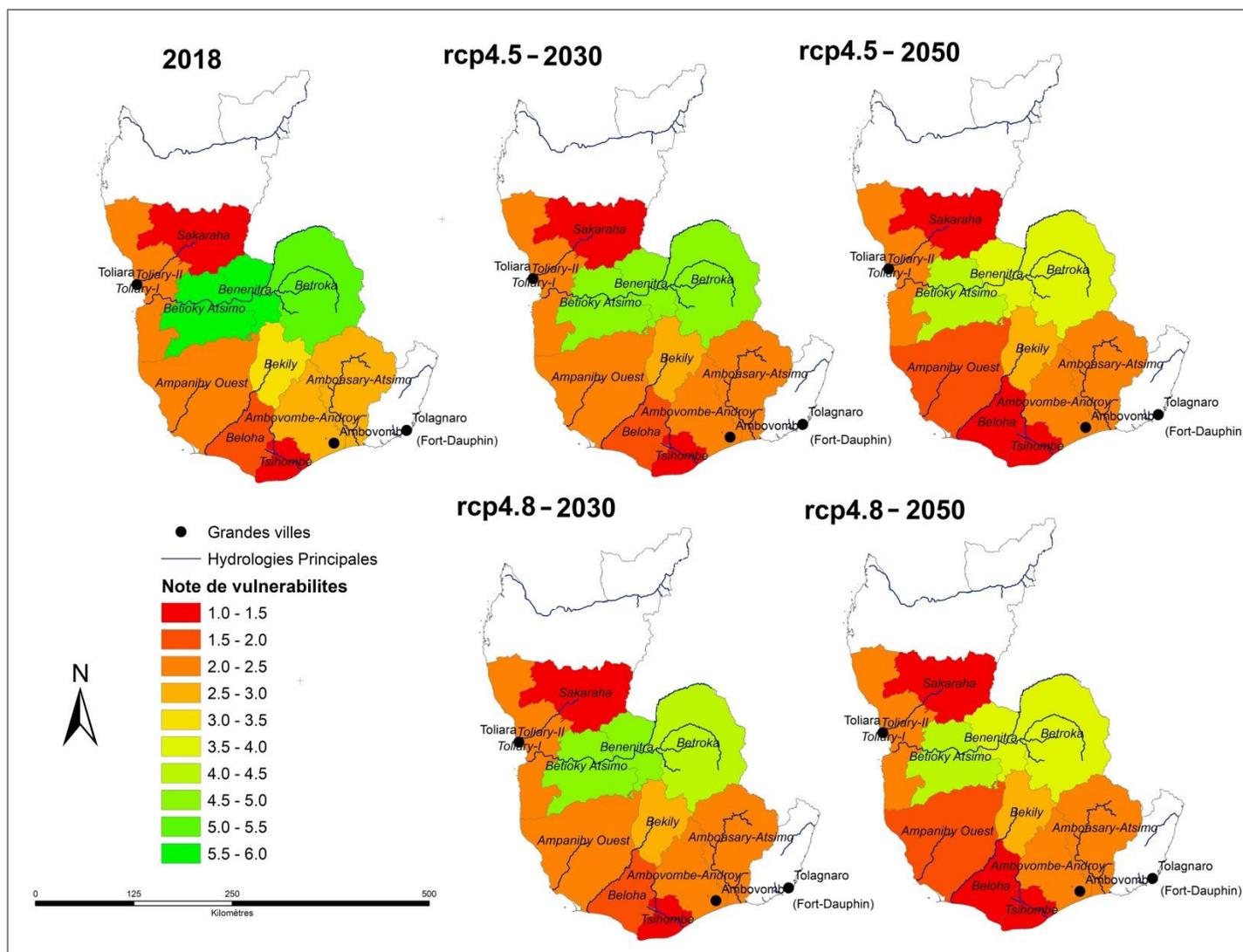
8. 4. Vulnérabilité en ressources en eau de la population des 3 Régions

La vulnérabilité en ressources en eau de la population des 3 Régions d’Atsimo Andrefana, Anosy et Androy pour le moyen terme se base sur l’exposition, la sensibilité et la vulnérabilité de la population face au changement climatique à moyen terme.

Tableau 13. Note de vulnérabilité en ressources en eau dans les 3 Régions

RANG	Bassin Versant	Région	District	2018	RCP4.5 2030	RCP4.5 2050	RCP8.5 2030	RCP8.5 2050
1	Fiherenana	Atsimo Andrefana	Sakaraha	1,43	1,20	1,18	1,18	1,16
2	Manambovo	Androy	Tsihombe	1,47	1,30	1,15	1,28	1,15
3	Manambovo	Androy	Beloha	1,79	1,62	1,47	1,60	1,48
4	Linta	Atsimo Andrefana	Ampanihy	2,46	2,10	1,78	2,07	1,79
5	Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara I	2,46	2,22	2,20	2,21	2,18
6	Fiherenana	Atsimo Andrefana	Toliara II	2,47	2,23	2,21	2,22	2,19
7	Mandrare	Androy	Ambovombe	2,64	2,40	2,13	2,35	2,13
8	Mandrare	Anosy	Amboasary-Sud	2,67	2,42	2,16	2,38	2,16
9	Menarandra	Androy	Bekily	3,17	2,94	2,86	2,84	2,87
10	Onilahy	Anosy	Betroka	5,42	4,51	3,75	4,46	3,83
11	Onilahy	Atsimo Andrefana	Benenitra	5,58	4,67	3,91	4,62	4,00
12	Onilahy	Atsimo Andrefana	Betioky (Sud)	5,84	4,93	4,17	4,89	4,26

(Source. Auteurs)



Carte 17 : Projection de la vulnérabilité en ressource en eau

Sur les 12 Districts concernées par l'étude, Sakaraha est le plus vulnérable en considérant son exposition à la variation des ressources en eau de surface disponibles pour répondre à ses besoins totaux, sa sensibilité par rapport au taux d'accès à l'eau potable et sa capacité d'adaptation en utilisant les ressources en eau souterraines disponibles. Globalement, les zones dans le sud de Madagascar sont vulnérables en termes de ressources en eau de surface pour les tendances à moyen terme. L'utilisation des eaux souterraines constitue un atout considérable pour faire face aux impacts du changement climatique. Ces ressources sont importantes pour répondre aux besoins croissants de la population pour les ménages, pour l'agriculture et pour l'élevage. L'accès en eau potable dans ces zones reste très faible et influe la vulnérabilité de la population.

8. 5. Discussions sur la vulnérabilité en ressources en eau

La situation des ressources en eau dans les 3 Régions du Sud de Madagascar décrit une tendance de diminution significative de 7 à 10% jusqu'en 2050 en considérant les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5. L'analyse a été présentée selon la modélisation hydrologique et les réalités actuelles de l'accès à l'eau potable et à la présence de ressources en eaux souterraines. Les comparaisons des quantités d'eau de surface disponibles avec les besoins en eau de la population en agriculture, en élevage et domestique ont montré une importante faiblesse de l'offre par rapport à la demande. Les besoins en eau agricoles correspondent à plus de 90% des besoins totaux en eau de ces 12 Districts. En considérant les eaux de surface estimées selon la modélisation hydrologique, les besoins en eaux domestique et pour l'élevage pourraient être couverts.

Les facteurs utilisés dans la modélisation hydrologique requièrent une disponibilité de données précises en quantité et qualité et sur une longue période. L'outil PCSWMM est un outil précis permettant une analyse approfondie et une modélisation des ressources en eau disponibles selon la location et la période donnée. Les résultats de la modélisation par bassin versant démontrent les variations de quantité de ruissèlement disponibles dans les jonctions représentatives des sous-bassins versants se déversant dans les divers cours d'eau. L'analyse s'est également basée sur la couverture environnementale et le climat pour apprécier les taux d'infiltration et les évapotranspirations par rapport aux quantités de pluie dans les zones.

La disponibilité annuelle des eaux de ruissèlement dans les zones d'analyse démontre une condensation de la disponibilité entre le mois de Novembre et d'Avril. Même si cette zone est classée comme zone aride, la pluie reste présente sur une partie de l'année. L'analyse s'est basée sur des données mensuelles et cela a permis d'identifier les disponibilités mensuelles de la ressource en eau de surface. Cependant, il est important de noter que ces quantités disponibles devraient être dépendantes de l'intensité et de la fréquence de la période de pluie pouvant impacter sur les capacités d'infiltration et de ruissèlement des eaux de pluie. Ainsi, ces résultats de modélisation peuvent être améliorés avec une disponibilité de données qui sont aussi plus précises et plus détaillées pour le Sud et pour tout Madagascar. Aussi les crues n'ont pas été considérées, ni les fortes évaporations causées par de longues périodes de sécheresse.

La fluctuation des quantités d'eau de ruissèlement disponibles montre également des cycles de saisonnalité de la présence des eaux de surface dans ces différents bassins versants. En moyenne, le cycle de saisonnalité est de 8 ans montrant un pic élevé, une transition sèche, des pics en dents de scie avec des sommets à quantité moyenne. Cette saisonnalité semble se raccourcir si l'on se réfère aux graphes. Ainsi, des périodes de saisons sèches pourront apparaître plus fréquemment.

La disponibilité des ressources en eau venant d'un événement pluvial ainsi que la détermination de la qualité de l'eau peuvent être modélisable avec l'outil PCSWMM en considérant à la fois l'eau de surface et l'eau souterraine si les données précises sur la nappe phréatique, les données de la qualité et les caractéristiques des sols sont disponibles. Une étude a été faite par l'Unicef (2021) sur la situation de sécheresse de la nappe phréatique dans le Sud. Cette étude a permis de démontrer l'impact de la sécheresse sur les ressources en eau souterraines en termes de recharge de la nappe et de qualité de l'eau. Seulement, elle est limitée en termes de modélisation de la quantité d'eau souterraine disponible dans cette région. La précision de la modélisation ne considère également pas les risques liés à l'érosion éolienne causée par le « Tio-mena » car aucune données liées à ces phénomènes ne sont utilisables.

9 Identification des alternatives d'adaptation pour le secteur « eau » et estimation des coûts de leur mise en œuvre

9.1. Niveau national

9.1.1. Plan National d'Adaptation au changement climatique (PNA) et Objectif du Développement Durable (ODD 6)

Les mesures alternatives d'adaptation pour le secteur eau doivent se référer aux « Objectifs de l'ODD 6 » et « le Plan National d'Adaptation au changement climatique (PNA) de Madagascar ». L'objectif de l'ODD 6 est de garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable (accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable). Quant au PNA, il s'articule autour de trois grands axes stratégiques définis comme suit :

- Axe stratégique 1 : Renforcer la gouvernance et l'intégration de l'adaptation ;
- Axe stratégique 2 : Mettre en œuvre un programme d'actions sectoriel prioritaire ;
- Axe stratégique 3 : Financer l'adaptation aux changements climatiques.

C'est surtout au niveau de l'axe stratégique 2 que les mesures alternatives dans cette étude se basent.

- Priorité stratégique 1 du PNA : préserver et sécuriser les ressources en eau par la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) (page 59 du PNA)
- Priorité stratégique 3 du PNA : soutenir la gestion durable de l'eau en période de sécheresse, notamment dans la partie sud du pays
- Priorité stratégique 5 du PNA pour le secteur, élevage et pêche : mieux gérer et économiser les ressources en eau (page 50 du PNA)

a. Programme / Politique de suivi et d'évaluation de l'écosystème des cours d'eau

Un suivi de l'écosystème hydraulique à Madagascar devrait être mise en place afin de faire une étude approfondie sur les ressources en eau existantes et leurs écosystèmes. Une structure pérenne au niveau national devra exécuter des programmes et projets relatifs à :

- Suivi de la quantité périodique de la ressource en eau existante : eau de surface et eau souterraine
- Suivi de la qualité périodique de la ressource en eau: eau de surface et eau souterraine
- Suivi des faunes et flores liée à la ressource en eau
- Suivi des risques d'érosion sur les berges des cours d'eau
- Mesures, analyse et suivi de l'utilisation de la ressource au niveau locale
- Etude et mise en place d'actions de protection et d'exploitation durable des ressources en eaux disponibles.
- Mise à disposition des données qualitatives et quantitatives à jour sur les ressources en eaux de Madagascar

L'ANDEA est une entité déjà existante et pérenne capable d'effectuer ces différentes attributions. L'appui technique et financière de cette institution pourra se faire par l'intermédiaire des fonds internationaux disponibles pour l'environnement et pour le changement climatique. Différents partenaires internationaux sont également disponibles pour des appuis techniques tels que l'Assistance CTC-N, travaillant directement avec les pays souhaitant implémenter des systèmes techniques relatifs à l'adaptation aux changements climatiques (<https://www.ctc-n.org/>).

Lors des travaux de groupe, il a été émis que le recensement des personnes vulnérables malgré les travaux de CCOK (Centre de Commandement Opérationnel contre le Kere) est difficile. Certaines activités ne sont pas localement acceptées comme les impluviums et deviennent répétitives. Beaucoup d'activités sont des doublons. Plusieurs partenaires travaillent dans le même projet (Beaucoup de projets similaires avec de nombreux partenaires). Pour les pipelines, le service après-vente n'existe pas engendrant un manque d'entretien maintenance. Pour y remédier, l'instance au niveau de MEAH et/ou de l'ANDEA devra assurer les activités suivantes :

- Promouvoir le Réseau Ran'eau travailler dans le Sud
- Le MEAH coordonne les activités liées à l'eau (ANDEA en tant qu'autorité désignée)
- Continuer la pérennisation des ouvrages, programme du ministère de changer les pompes et utilisation de systèmes gouttes a gouttes
- Eviter les activités répétitives (impluviums, ...)
- Assurer la synergie des activités au niveau central et régional

b. Capitalisation de données et partenariat multi-secteur

Le secteur eau est un secteur-clé dont dépend d'autres secteurs économiques et sociaux du pays. La disponibilité de données quantitatives et qualitatives relatives à la ressource en eau est indispensable pour les autres secteurs notamment l'agriculture, l'élevage et la santé.

Aussi, la mise en place d'une base de données intersectorielle sur l'eau devrait être mise en place. Cette base de données devra également être gérée par une entité pérenne telle que l'ANDEA et la DGM.

Ces données doivent concerner les services suivants :

- Données climatiques et météorologiques à jour
- Données sur les quantités et les qualités de l'eau des bassins versants
- Données sur les quantités et les qualités des ressources en eaux souterraines
- Données sur l'inventaire des ressources en eaux existantes à Madagascar
- Données sur la qualité et la quantité d'eau disponibles à Madagascar à jour
- Données sur l'utilisation de l'eau agricole à Madagascar
- Données sur l'utilisation de l'eau pastorale à Madagascar
- Données sur les impacts de la qualité de l'eau sur la santé à Madagascar

Cette liste n'est pas exhaustive mais ces données sont obtenues et utilisées par différents secteurs à Madagascar. Une coordination continue et durable devrait être mise en place entre les secteurs concernés pour une efficacité des données produites et utilisées dans le développement du pays et dans l'adaptation au changement climatique.

9. 1. 2. Politique nationale en eau et la situation en eau dans les 3 Régions du Sud de Madagascar.

a. Gestion individuelle des infrastructures

Le MEAH s'attelle à renforcer la mise en place d'infrastructure d'adduction d'eau potable à Madagascar. Cependant, la durabilité des infrastructures dépend majoritairement de l'appropriation des acquis par les bénéficiaires. Aussi, le renforcement du capital humain et social est une priorité pour l'atteinte des objectifs de l'État dans l'augmentation du taux d'accès à l'eau potable, l'hygiène et l'assainissement à Madagascar.

b. Protection des ressources existantes

Des activités de suivi sur le terrain sont prévues dans le Code de l'eau avec 2 descentes annuelles au minimum. Ces descentes sont effectuées par les Directions Régionales du MEAH. Ces descentes ont pour objectif de faire un suivi technique et financier de la gestion des infrastructures en eau potable. Cependant, faute de moyen financier, les Directions Régionales ne sont pas en mesure d'effectuer ces visites régulièrement. Un renforcement est donc nécessaire pour l'effectivité de cette activité.

c. Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement (SDEA)

Le SDEA est un document de référence adaptatif pour tous les acteurs intervenant dans le secteur eau au sein de ces Régions. Le document présente la situation en eau de l'agence de bassin (AB) dans un cadre global. Les études présentent la situation globale en eau incluant la disponibilité des eaux de surface et des eaux souterraines, les besoins en eaux de surface et souterraines pour la population, l'irrigation et pour le bétail dans les régions constituant l'Agence de Bassin. Les résultats présentent également les données selon l'horizon 2025. Sur le plan légal, la politique et les stratégies de mise en œuvre du schéma d'aménagement sont inclus dans le document. Les plans d'action de mise en œuvre du SDEA prévoient les différentes mises à jour du SDEA et définissent les investissements requis pour la période 2015-2025.

Les zones incluses dans les Agences de Bassin sont les suivantes :

- Centre-Ouest comprenant une partie de la Région Atsimo Andrefana, dont les districts de Beroroha et d'Ankazoabo Sud
- Sud-Est comprenant une partie de la Région Anosy, District Taolagnaro
- Sud-Ouest comprenant la Région Atsimo Andrefana, la Région Anosy et la Région Androy

d. Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC)

Le BNGRC est une structure rattachée au Ministère chargé de l'Intérieur avec des démembrements au niveau territorial (Loi 2014-018 et 2014-020). Il est chargé de la conception, l'organisation, la conduite, la coordination et l'évaluation des activités en lien avec les préparations aux urgences, les opérations de secours et les sauvetages des vies humaines, de réponses humanitaires et de relèvements précoces. Les missions du BNGRC sont principalement d'ordre humanitaire et environnemental :

- Mettre en place, en collaboration avec les organisations spécialisées (météorologiques, scientifiques et autres), des systèmes permettant aux différents cibles (autorités, parties prenantes et populations locales) d'être avertis à temps de l'évènement d'une catastrophe majeure ;
- Vulgariser les moyens d'alerte et former chaque organisme cible ainsi que le grand public des comportements individuels, ménages et communautaires à adopter à chaque niveau de vigilance ;
- Former les autorités locales sur la diffusion des alertes proportionnelles au niveau de vigilance émis par les organisations spécialisées de prévision météorologiques, de risques géologiques et autres
- Définir, planifier et mettre en œuvre les activités de préparations aux urgences ;
- Mettre en œuvre et coordonner les actions de secours d'urgence et les réponses humanitaires aux catastrophes, initiées par les structures sectorielles et spécialisées nationales et territoriales d'intervention concernées ;
- S'assurer de la gestion de crise et des situations d'urgence ;

- Préparer, conduire et coordonner les évaluations des impacts des différentes interventions enregistrées ;
- Programmer et coordonner les évaluations sectorielles et multidimensionnelles (urgence, et tendant vers le relèvement précoce et la résilience) des populations affectées par les catastrophes ;
- Mobiliser tous les partenaires techniques et financiers en vue des réponses aux urgences et aux catastrophes ainsi que du relèvement précoce ;
- Assurer le suivi des opérations d'intervention d'urgence humanitaire et de rétablissement précoce

9. 1. 3. Formation continue pour les acteurs locaux par le MEAH et les DREAH

Selon le décret n° 2016-250 du 10 avril 2016, le Ministère MEAH a procédé à la fusion de deux Directions (DSI et DES devenu DSISE) dans la nouvelle structure et à l'introduction de la Direction Générale en charge de la Coordination des Organismes et Projets rattachés. Un site web donnant les informations sur les eaux sous-terraines et les eaux de surfaces, sur les infrastructures établies par nombre de population, par nombre de ménages et par région ainsi que la budgétisation (BPOR : Budget Programme Objectifs Régionaux) est disponible <http://www.mineau.gov.mg:8080/seam/index.php/accueil>. Les tâches du Ministère sont amplement détaillées dans l'article 1 de ce décret. Parmi ces tâches, il y a :

- Le renforcement de l'efficacité de l'Administration et des partenaires notamment en matière d'alimentation en Eau potable
- La sensibilisation pour le changement de mentalité, de comportement et des habitudes en matière de gestion de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène (Priorité précédente)
- Contrôle et suivi des respects des normes, réglementations et qualités requises dans le domaine de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène

9. 1. 4. Information, Education, Communication (IEC)

Il est vrai que le droit à l'eau est une nécessité indispensable, mais le devoir de ne pas la polluer, la gaspiller est encore plus indispensable. La protection des ressources en eaux, la mise en valeur et le développement des ressources utilisables dans le cadre des équilibres naturels sont d'un intérêt général pour la nation et le monde. Il est alors judicieux de respecter ce noble principe et considérer l'eau comme un bien économique et social et son accès est un droit pour chaque individu.

9. 2. Niveau inter-régional

De façon générale, la présente étude a montré que le volume en eaux de surface dans la région Androy et l'Ouest de la région Anosy n'est pas suffisant pour satisfaire les besoins de la population locale. Du côté du fleuve de Mandrare, l'eau de surface valable uniquement sur un faible laps de temps peut être stockée puis répartie selon les besoins annuels. Dans ces régions, les eaux souterraines seront sollicitées car elles sont la seule source d'eau pérenne à

l'échelle annuelle dans ces régions. Il faut investir plus sur l'amélioration de la qualité de l'eau (Eaux saumâtres, eaux à faible minéralisation). Les volumes d'eau stockés dans les roches sont ainsi un paramètre déterminant pour quantifier les ressources actuelles mais également pour estimer l'impact des changements en cours. Selon l'analyse de sensibilité, les projets d'adduction en eau dans ces régions sont urgents.

Pour la région Atsimo Andrefana, le fleuve Onilahy et Fiherenana disposent d'un volume élevé en eaux de surface dans le présent ou dans les scénarii futurs. De plus, il a été trouvé que l'eau souterraine au niveau de cette région est saumâtre et parfois salée. Aussi, il est suggéré d'investir sur l'exploitation des eaux de surface voire même la capture (changement de cours d'un fleuve, rivière, affluent, ruisseau, détourné de son tracé primitif par une autre rivière plus active) suivi d'une déviation Nord-Sud afin d'alimenter les régions du Sud.

9. 2. 1. Programmes et structures existants

i. Projet d'amélioration des capacités d'adaptation et de résilience face au changement climatique dans les communautés rurales

Le projet PACARC (Projet d'amélioration des capacités d'adaptation et de résilience face au changement climatique dans les communautés rurales : 2015 – 2021) a pour objectif (en partie dans le secteur eau) de procurer un accès durable à l'eau pour les humains, les animaux et l'agriculture. Le projet a pour but de réhabiliter/construire des puits jusqu'à 10 m et des forages jusqu'à 60 m, de réhabiliter/construire d'autres infrastructures hydro agricoles (barrages, bassins de retenue d'eau pluviale, canaux d'irrigation, impluviums) au niveau de sept (7) districts : Ambovombe, Bekily, Tsihombe, Beloha, Ampanihy, Betioky, Amboasary. Il est aussi prévu d'augmenter le renforcement de capacités des acteurs. Onze (11) stations climatiques avec un lot d'équipements est également prévu.



Photo 8: Station météorologique à Sampoina

ii. UNICEF et le bulletin sècheresse

Un système de surveillance de la sécheresse (système de monitoring de la sécheresse (SMS)) pour le Sud de Madagascar a été développé par l'UNICEF, en collaboration avec le Centre de Recherche Commun de l'Union Européenne et le Ministère de l'Eau, de l'Hygiène et de l'Assainissement (MEEH & UNICEF, 2020). Ce système de surveillance est basé sur des indicateurs de sécheresse (précipitations et anomalies de croissance de la végétation/NDVI) dérivés d'images satellites (CHIRPS et MODIS) et des données sur les eaux souterraines (niveaux d'eaux des nappes et salinité de l'eau). De ces données satellitaires, les tendances historiques de la sécheresse sont déterminées à partir des moyennes long-termes. Les tendances historiques de la sécheresse sont déterminées à partir des moyennes long-termes (20 ans pour les précipitations et 17 ans pour le NDVI). Ces tendances servent de base de référence (baseline) à laquelle les conditions actuelles sont comparées en cours de l'année, permettant ainsi de différencier les niveaux de sévérité de la sécheresse. Quant aux nappes, leurs conditions initiales au moment de la construction des forages servent du niveau de référence.

Un bulletin mensuel d'alerte à la sécheresse incluant l'étendue de la sécheresse et son impact sur les ressources en eaux souterraines est diffusé à toutes les parties prenantes à Madagascar. Le SMS améliore la planification des pratiques d'adaptation à la sécheresse telles que le "Water Trucking" et aide à déclencher des réponses rapides à la sécheresse dans le Sud. Il permet également la surveillance des eaux souterraines afin d'identifier les systèmes d'approvisionnement en eau potable présentant des risques de tarissement des nappes et/ou d'augmentation de la salinité. Des informations sur le prix de l'eau en zones urbaines et zones rurales sont également évoquées dans ces bulletins. Les données du SMS sont confrontées aux évaluations de la sécurité alimentaire et de la nutrition afin de mieux cibler les populations vulnérables dans les districts du sud touchés par la sécheresse. Le dernier bulletin sècheresse remonte à Décembre 2019 (Bulletin N°13).

iii. GIZ – PRADA et le conseil agro-météorologiques et agricoles

C'est un projet intitulé « Adaptation des chaînes de valeur agricoles au changement climatique (PrAda) ». Le projet est déployé dans les régions de l'Anôsy, de l'Androy et de l'Atsimo-Atsinanana situées dans le sud aride du pays. C'est un projet sous ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. En outre, l'institut météorologique (SRM : Service Régional de la Météorologie et DGM : Direction Générale de la Météorologie) est un partenaire du projet. Au niveau régional, le projet coopère notamment avec les chambres de commerce et d'industries compétentes, les associations paysannes locales et des entreprises privées. Dans le domaine de la météorologie et les données sur le climat, les acteurs des chaînes de valeur bénéficient d'un meilleur accès à des services de conseil agro-météorologiques et agricoles, ce qui leur permet d'adapter la production au changement climatique. Les activités dans cette composante sont la collecte et le traitement de données agro-météorologiques, le développement de produits d'informations agro-météorologiques, l'amélioration de la structure de communication pour la diffusion des informations agro-météorologiques. Ce projet appuie également la mise en place d'assurances contre les risques

climatiques. Dans d'autres termes, les acteurs intervenant dans le secteur agricole sont en mesure de se prémunir contre le manque à gagner résultant des phénomènes climatiques et météorologiques.

iv. Service de Lutte anti-acridienne ou IFVM

La situation acridienne est conditionnée par la météorologie. L'IFVM, remplacement de l'ancienne structure, qui n'est autre que le CNA (Centre National Antiacridien), dispose dans la majorité de ses sites d'intervention, des stations météo autonomes servant à accueillir des données météorologiques pertinentes et concrètes telles que la température, la vitesse du vent, les précipitations. Parmi les Huit (08) zones antiacridiennes à Madagascar, cinq (5) sont localisées dans les trois régions : Zone 1 Befandriana-Sud, Zone 2 Sakaraha, Zone 3 Ejeda, Zone 4 Ambovombe, Zone 6 Ampanihy.



Photo 9 : Station météorologique de l'IFVM à Ambovombe

v. Le programme AFAFI Sud et les aménagements hydro-agricoles

Le programme AFAFI-SUD (Appui au Financement de l'Agriculture et aux Filières Inclusives dans le Sud et le Sud Est de Madagascar) s'inscrit dans la continuité du programme ASARA-AINA de sécurité alimentaire. Avec les partenaires techniques et financiers, le programme agit dans des actions transversales d'autres projets comme le programme d'adduction d'eau potable (UNICEF). Ces projets/programmes concernent des domaines tels que les filières agricoles vivrières ou de rente, l'alimentation et la nutrition, la pêche, l'alimentation en eau potable, l'aménagement hydro-agricole, l'agroécologie, l'adaptation aux changements climatiques, la conservation/protection de l'eau, des sols et de la végétation.

vi. Le programme DEFIS et la gestion de l'eau

Le programme DEFIS est un programme de développement agricoles et rural sous tutelle du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la pêche, dans la région Anosy et Androy. Les activités du programme DEFIS au niveau de ces régions se focalisent sur la gestion de l'eau, la promotion des secteurs d'activités prioritaires en vue d'assurer les revenus durables des paysans, le développement de la production rizicole à travers la distribution des semences approprié aux 2 régions. Le Programme DEFIS est un programme sous le financement du FIDA.

vii. Conseil Diocésain de Développement

L'institution a été créée suite à la grande sécheresse qui sévit le Sud de Madagascar. Son but est de promouvoir le développement de tout homme dans une optique de développement durable en termes de développement socio-économique, culturel et protection de l'environnement. Elle pratique des activités d'assainissement, d'hygiène et d'adduction d'eau potable. Elle organise des formations et sensibilisations de la communauté à adopter différentes techniques d'adaptation au changement climatique comme la construction des maisons solides. Des activités de promotion de la femme sont faites par l'amélioration des techniques agricoles avec les semences améliorées à cycle court terme. Le CDD participe également à la mise en place de magasin de stockage de vivres dans le cadre du programme de nutrition communautaire.

Les objectifs à moyen et à long terme du CDD face au changement climatique sont les suivantes :

- Gestion des ressources naturelles au niveau de la population ;
- Créations de zones de protections et diminution des pressions sur l'environnement ;
- Multiplication des foyers améliorés ;
- Amélioration de la vie économique.

9. 2. 2. Programmes et projets proposés

a. Solutions d'adaptation sur l'agriculture et l'élevage

L'étude a montré une forte proportionnalité des besoins en eau de l'agriculture, atteignant jusqu'à 95% des besoins totaux en eau. Une des majeures solutions à prendre en considération est la réduction des besoins en eau de l'agriculture.

➤ *Choix de semences améliorées*

Les résultats ont montré que les besoins en eau agricole sont très élevés et représente plus de 90% des besoins totaux. Il est alors recommandé de vulgariser et de sensibiliser la population locale sur la pratique de spéculations à faible besoin d'eau comme le Manioc ou la Patate douce. La culture du maïs est très importante pour les populations du Sud, cependant, cette culture a besoin de beaucoup d'eau dans toute sa période de croissance. Les techniques très adaptées au contexte du Sud doivent être consolidés. Le processus de recherche appliquée du CTAS - ONG malgache basée dans l'Androy. Ce processus se concentre sur les résiliences

via : a) l'introduction de matériel végétal amélioré, b) la production et diffusion de semences améliorées à travers une ferme semencière, un réseau de Paysans multiplicateurs de semences (PMS) et de boutiques d'intrants et un mécanisme de certification simplifiée « semences de qualité déclarée », c) la création et l'extension de modèles de blocs agroécologiques, combinant protection antiérosive et restauration de la fertilité des sols par les légumineuses, d) l'amélioration des petits ruminants et de la volaille, e) le développement de pratiques ou de pilotes intégrés en agriculture climatiquement résiliente.

➤ ***Valorisation de cactus et exploitation de graines***

Le cactus a longtemps été une solution d'adaptation pour les populations locales soit pour leur propre alimentation soit pour celle du bétail. Le cactus pourra servir de plantes pour la constitution de parcs à fourrage dont les fruits seront consommés par le bétail et les hommes. Le cactus représente également une solution contre la famine (Ranaivoarisoa *et al.*, 2018). Le cactus peut être exploité comme : consommation des fruits du cactus frais ou transformés en concentrés de pulpes, confitures et jus, mais de manière artisanale. Les graines peuvent être valorisées : production d'huile (rendements : 15 à 25 tonnes de fruits frais par ha, soit 300 kg de graines donnant 0,3 litres d'huile de cactus par ha). De plus le cactus peut être utilisé comme barrière éolienne pouvant protéger contre les vents de sable ou Tio-mena. Il est également un moyen de lutte contre l'érosion avec sa capacité de fixation du sol et sa flexibilité de plantation sur les terrains en pente. Le plus grand avantage de la culture de cactus est sa capacité d'adaptation dans les terrains arides. La consommation en eau des plants de cactus est très faible et peuvent surmonter des précipitations de moins de 200 mm/an (ONUDI, 2015). Malgré le fait que cette spéculation est néfaste à l'agriculture, l'utilisation de cette stratégie impose une diversification des AGR des différentes zones d'exploitation dans les Régions du Sud. Aussi, la pratique de l'agriculture dans certaines zones devrait être questionnable par rapport à la disponibilité des ressources en eau pour ces activités. Le cactus rouge n'est pas adéquat au sol.

➤ ***Développement des investissements privés agricoles***

L'exploitation agricole dans le Grand Sud de Madagascar requiert un investissement conséquent pour la mise à disponibilité des ressources en eau, en intrants pour obtenir un bon rendement. Cette zone possède un potentiel au niveau de la surface exploitable et au niveau de la consommation. Les ressources en eau sont également présentes malgré son insuffisance et sa périodicité. Cependant, la mise en place d'infrastructures de stockage d'eau, l'utilisation de techniques améliorées d'irrigation et le choix de variétés agricoles adaptés à la zone pourra rendre des investissements rentables. L'implication du projet dans le processus de lutte contre la famine facilitera l'investissement du programme et la mise en œuvre des actions de lutte contre la vulnérabilité en eau et en nourriture dans la partie Sud de Madagascar. Une initiative d'appuis du secteur privé dans la mise en place des projets pourra ainsi permettre de mettre en place une approche sur le long terme de la lutte contre la famine et l'exploitation rationnelle et efficace des ressources en eau disponibles dans la zone sud de Madagascar.

b. Investissement sur l'environnement

La pérennisation des ressources en eau dépend directement de la gestion de l'environnement. L'approche GIRE préconisée par le MEAH devra être appliquée au niveau national sur tous les bassins versants. Son application requiert un inventaire des ressources en eau de Madagascar (fleuves, rivières, lacs, ...) mis à jour périodiquement et présentant toutes les caractéristiques hydrologiques et physiques. Ces informations devraient être complètes incluant les qualités et quantités d'eau au niveau des différents points et côtes de la ressource en fonction du temps et de la localisation. Ces données pourront ainsi être étudiées pour la protection des bassins versants et son exploitation rationnelle et efficiente.

c. Entretien et maintenance des infrastructures existantes

Les études faites ont montré que de nombreuses infrastructures existantes ne sont plus fonctionnelles faute de manque d'entretien, de systèmes non-conformes, d'assèchement des plans d'eau et des manques de moyens financiers et matériels. Aussi, il est important de mettre en place une stratégie de gestion et de maintenance des infrastructures existantes pour une durabilité des infrastructures en place. L'actuelle solution de gestion privée et communautaire ne répond pas aux besoins d'entretien coûteux des systèmes mis en place. La technologie utilisée et les difficultés d'accès aux ressources rendent les coûts d'entretien et de maintenance très élevé que les bénéficiaires ne peuvent pas supporter. Un budget public devrait être alloué pour l'entretien et la maintenance des systèmes d'adduction d'eau potable. Une proportion de prise en charge devrait être appliquée au niveau national.

Tableau 14. Proposition de gestion des entretiens et maintenance

Coût d'entretien	Nombre de bénéficiaires	Entité Responsable
1 – 2000000 Ar / an	1-500 ménages	Bénéficiaires
2000000 – 10000000 Ar / an	1-1000 ménages	Gestionnaire privé
10000000 – plus	1 – plus de 1000 ménages	Subvention de l'Etat et partenaires techniques et financiers

(Source. Auteurs)

Les réalités sur le terrain montrent que le paiement des services de l'eau n'est pas une priorité pour la population et une mauvaise gestion des infrastructures en résulte. Aussi, le tableau suivant se base sur une possibilité de paiement de 10000 Ar/an/ ménage pour le paiement des services relatifs à l'eau. Cette probabilité a également été utilisée pour les systèmes en zones péri-urbaines et urbaines avec les gestions privées. Pour les grands projets avec des coûts d'entretien onéreux, l'Etat devra supporter l'entretien et la maintenance des réseaux pour permettre l'entretien et la maintenance des systèmes.

d. Approvisionnement en eau potable et irrigation dans les Districts d'Amboasary et d'Ambovombe par la construction de barrage hydro-électrique sur la rivière Efaho (Rakotondrainibe 2020)

Ce projet de mise en place d'un barrage hydro-électrique sur la rivière Efaho est un projet permettant l'approvisionnement en eau des zones arides d'Ambovombe et d'Amboasary, mais également permet de fournir 1.2 MW d'électricité qui servira en partie au pompage de l'eau stockée d'un débit de 0.5m³/s au niveau du barrage. Un réservoir de 1000 m³ approvisionnera le système gravitaire pour la distribution de la ressource (Rakotondrainibe 2020). Le coût du projet s'élève à 159 035 310 USD.

Tableau 15. Coût de la mise en place du projet d'approvisionnement en eau potable et irrigation par barrage hydro-électrique sur la rivière Efaho

Désignation	Unité	Qté	PU (10 ³ Ariary)	Montant en (10 ³ Ariary)	Montant en USD
Etude préliminaire	Forfait	1	600 000 000	600 000	156 000
Travaux de construction du barrage	Pièce	1	13 593 600 000	13 593 600	3534336
Travaux de construction des réservoirs	Pièce	1	200 000 000	200 000	52 000
Conduite d'amenée et de distribution	Pièce	1	2 000 000 000	2 000 000	520 000
Travaux de construction du réseau hydro-agricole	Pièce	1	595 280 660 480	595 280 660	154 772 975
Montant total				611 674 260	159 035 310

(Source. Adapté de Rakotondrainibe, 2020)

e. Approvisionnement en eau par forage

L'approvisionnement en eau par un système de forage est le moyen le plus efficace pour les zones enclavées et éloignées par rapport aux cours d'eau pérennes. Le niveau de forage moyen pour obtenir de l'eau de qualité est estimée à 60 m (APC ressources) et le coût d'une infrastructure de forage permettant d'approvisionner une communauté est de 70 000 000 Ar, soit 20000 USD.

Tableau 16. Coût d'installation d'un système de forage

Désignation	Unité	Qte	PU (10 ³ Ariary)	Montant en (10 ³ Ariary)	Montant en USD
Installation et repli de chantier	Pièce	1	29 843 000	29 843 000	77 591
Réalisation du forage	Pièce	1	11 770 000	11 770 000	30 602
Equipement	Pièce	1	9 072 798	9 072 798	23 589
Développement et essai de débit	Pièce	1	6 064 100	6 064 100	15 766
Analyse chimique et bactériologique	Pièce	1	3 048 090	3 048 090	7 925
Coût de formation et visualisation	Forfait	1	3 255 000	3 255 000	8 463
Travaux annexes au forage	Forfait	1	2 595 100	2 595 100	6 747
TVA	%	20%	1 312 961 767	13 129 617	34 137
Montant total				78 777 706	204 822

(Source. APC Resources SARL, 2021)

➤ **Suivi de la nappe phréatique**

Réaliser de nouvelles infrastructures de suivi de la ressource plus particulièrement dans les zones vulnérables identifiées : Piézomètres équipés d'enregistreur automatique. Cette technique est en cours grâce au financement et projet de l'Unicef en partenariat avec les DREAH. L'extension de ce projet permettra d'obtenir une carte détaillée des nappes phréatiques dans la partie sud de Madagascar. L'utilisation de la nappe phréatique est la solution efficiente pour les Régions Anosy et Androy à cause de la faiblesse des ressources en eaux de surface disponibles. Aussi, la mise en place d'infrastructures d'exploitation des ressources en eaux souterraines requiert une meilleure connaissance de la nappe à l'aide de l'outil piézométrique. Un renforcement du système en place permettra de renforcer l'acquisition de données précises et plus étendue. L'utilisation d'un réseau de forte densité est préconisée avec 500 points situés à 150 km de la base opérationnelle avec des relevés mensuels sur une période de 5 ans.

Tableau 17. Coût estimatif du suivi de la nappe phréatique dans les 3 Régions

Année	Activités	Coûts (USD)
1	Diagnostic du réseau piézométrique	50 000
2	Nivellement des têtes de forages	20 000
2	Coût d'installation du réseau piézométrique	2 000 000
Annuel	Administration et communication	350 000 (x5)
Annuel	Maintenance des piézomètres	600 000 (x5)
TOTAL		6 820 000.00

(Source. Auteurs)

Le coût estimatif du suivi de la nappe phréatique par l'utilisation de piézomètres s'élève à 6 800 000 USD.

➤ **Réhabilitation et construction d'infrastructures d'irrigation et d'infrastructures pastorales**

L'établissement/réhabilitation de barrages de retenues, de dérivation, des réseaux d'irrigation et de micro-irrigation ont été identifiés comme besoins principaux surtout dans les zones parcourues des fleuves (disponibilité en eaux de surface) : fleuve de Mandrare, Menarandra, Linta, Manambovo. Une forte potentialité agricole peut être valorisée par les moyens d'irrigation durables. Les résultats des études ont montré qu'une amélioration des systèmes d'abreuvoirs et de l'irrigation pastorale a été fortement demandée. Le forage avec des systèmes de pompage solaire est le plus efficace mais présente également des limites.

➤ **Adduction en eau dans les régions : BPOR (Budget Programme Objectifs Régionaux)**

Avec la base de données SESAME du MEAH, un système de budgétisation de travaux à faire dans toutes les régions de Madagascar est disponible. Par rapport aux résultats d'exposition, de sensibilité et de capacité d'adaptation, il a été déduit que les districts suivants méritent une attention particulière et de façon urgente pour l'adduction en eau

Les BPOR pour les Régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy sont décrites dans le SDEA des agences de bassin respectif. Ces budgets prennent en compte la construction de points d'eau pour l'adduction d'eau potable de 2015 et des horizons 2020 et 2025.

Tableau 18. Récapitulatif des coûts du BPOR dans les Régions Anosy, Androy et Atsimo Andrefana par Agence de Bassin

Région	Désignation	2015	2020	2025	Total
Atsimo Andrefana (CO)	Coût total PDO à construire (10 ³ USD)	1 329	1 715	1 347	4 391
Androy (SO)	Coût total PDO à construire (10 ³ USD)	748 915	886 942	691 267	2 327 124
Anosy (SO)	Coût total PDO à construire (10 ³ USD)	269 823	389 788	306 157	965 768
Atsimo Andrefana (SO)	Coût total PDO à construire (10 ³ USD)	14 056	18 135	14 244	46 435
Anosy (SE)	Coût total PDO à construire (10 ³ USD)	513 822	742 271	583 011	1 839 105
TOTAL des couts prévisionnel de réalisation du BPOR (10 ³ USD)		1 547 945	2 038 851	1 596 026	5 182 823

(Source. Auteurs)

Le coût total de la construction des points d'eau dans les Régions d'Anosy, Androy et Atsimo Andrefana pour atteindre un taux de 100% de desserte en eau potable pour 2025 s'élève à 5 182 823 000 USD. Ce coût concerne la construction de pompes à motricité humaine, des forages à motricité humaine, des systèmes d'adduction d'eau potable gravitaire, des systèmes d'adduction d'eau potable par pompage et des systèmes d'adduction d'eau potable par pompage utilisant des pipelines.

➤ **Discussion sur d'autres options : dessalement de l'eau de mer, utilisation d'énergie renouvelable (marémotrice, énergie photovoltaïque)**

Un des avantages d'être une île est que la ressource en eau de mer est inépuisable. Cependant le dessalement est très énergivore. L'eau de mer contient en moyenne 35 g de sel par litre, contre de 1 à 10 g pour les eaux saumâtres. Une usine dans l'Etat de l'Australie du Sud (South Australia) utilise 3,47 à 3,70 kilowattheures d'électricité par kilolitre d'eau produite (1m³). Dans ce même Etat, 1,4 milliard de dollars ont été investis pour une production d'eau de 50 millions de litres par an, pouvant satisfaire les besoins en eau. Le prix de revient de la production d'eau est fonction de la technique utilisée : 10.75USD/m³ par distillation, 3,6USD/m³ par électrodialyse et 1,2USD/m³ par osmose inverse. Par osmose inverse les eaux sont si pures qu'elles doivent être reminéralisées, ce qui implique des coûts supplémentaires. Il faut rajouter enfin les coûts distribution. Le coût de 1m³ (catégorie première tranche) est de 415 Ariary soit 0.11USD.

De plus ces limites économiques, l'impact de ces systèmes de production d'eau est surtout lié aux rejets dans le milieu naturel non seulement des saumures concentrées mais aussi des additifs nécessaires au traitement (produits d'ajustement du pH de l'eau, produits antitartres et agents antisalissures, agents antimousses et dérivés du chlore). Par exemple pour une production de 10 m³/h, le rejet est de 20 m³/h. Selon WWF, le dessalement de la mer est un moyen coûteux, énergivore et émettant des gaz à effet de serre d'obtenir de l'eau. La faune et la flore marine peuvent être menacées ; plusieurs études ont montré que l'herbier de posidonie est très sensible aux variations de la salinité. Le dessalement peut aussi avoir un impact négatif sur le milieu marin, car elle rejette localement des saumures en mer.

Pour réduire les coûts, les procédés de dessalement par énergie solaire thermique et énergie éolienne, énergie des vagues (marémotrice) devraient être les applications les plus prometteuses des énergies renouvelables pour le dessalement de l'eau de mer. Cette technologie est, d'autre part, appropriée à des stations de dessalement de petites tailles, particulièrement dans les régions arides éloignées et des îles, où l'approvisionnement en énergie conventionnelle est rare et onéreux . Le coût de revient pour la production de d'eau douce est de 2,4USD/m³ mais les panneaux photovoltaïques produisent également un excédent d'électricité pour 200 ménages. Pour ce qui concerne la pollution, elle peut être atténuée avec des cuves de récupération des eaux de nettoyage, puis avec le rejet maîtrisé de la saumure avec la possibilité de la traiter par lagunage ou encore de la diluer au niveau des courants marins. Il faut savoir que la saumure est une eau salée à 50 g/L qui se dilue dans une eau de mer à 35 g/L. Enfin, les membranes sont désormais en polysulfone (au lieu de l'acétate de cellulose) et ont une durée de vie de plus de 5 ans en utilisation continue.

➤ **Se tourner vers d'autres activités génératrices de revenus non directement liées à l'eau : pêche**

L'agriculture est consommatrice d'eau. Une solution est de tourner vers d'autres ressources comme la pêche. La promotion de la filière pêche entraîne l'amélioration des techniques et des infrastructures d'évacuation des produits (routes) à l'exemple des activités suivantes :

- Entreposage des produits
- Promouvoir les contrats de cogestion des ressources impliquant les communautés locales avec les partenaires comme Blue Ventures, MIHARI...
- Professionnalisation du secteur de la petite pêche
- Transformation, conservation, commercialisation
- Promouvoir l'éducation civique sur l'assainissement

Ce changement d'activité implique avant tout l'acceptation de la population locale, un éventuel changement de culture (Le Zébu représente un symbole important pour la population locale du Sud). Il faut donner une assurance à la population locale que les produits agricoles seront fournis à partir d'autres zones de productions. Les flux d'échanges de produits ne sont possibles que si les infrastructures de support physique (route) et législatifs (impôts, ristournes) soient mis en place.

9.3. Niveau régional

9.3.1. Région Atsimo Andrefana

a. Programmes et structures existants

i. Projet APAA du PNUD

Le projet APAA financé par le PNUD et en partenariat avec le MEDD et les ONG Tany Meva et SAGE consiste à la protection de la biodiversité dans la Région Atsimo Andrefana et à son exploitation durable selon un cadre de gouvernance concerté entre les parties prenantes. Ce projet met en place une plateforme numérique géoréférencé regroupant les bases de données disponibles dans la Région Atsimo Andrefana. L'opérationnalisation de cet outil servira d'aide à la prise de décision des décideurs et de sources d'information pour les acteurs. Une partie du projet se focalise sur la création d'un réseau d'aires de conservation communautaire pour une exploitation rationnelle et durable des ressources tout en protégeant les habitats menacés existants.

ii. WWF et la conservation des sites Ramsar (Zones humides)

Le WWF prend en charge la conservation, la restauration et la surveillance des zones humides y compris les points d'eau au niveau des 7 lacs et le fleuve Onilahy (Aire protégée de Tsimanampetsotse et d'Amoron'ny Onilahy : site RAMSAR). Le WWF travaille en collaboration avec la DGM pour la collecte des données météorologiques. Quelques stations météorologiques ont été installés afin d'avoir des données plus précises et des prévisions météorologiques trimestrielles et également semestriel. La sensibilisation à la culture maraichère et à la rotation culturale est également faite au niveau des agriculteurs. A partir des prévisions météorologiques, des calendriers culturaux sont proposés (par le DGM et le

ministère de l'agriculture) pour diriger les activités des agriculteurs. Ce calendrier indique non seulement le moment idéal pour placer les semences mais propose également de choisir la culture qui convient avec la saison et le climat. De plus, le suivi des données sur la précipitation aide la communauté à leur préparation : dans le cas d'une menace de sécheresse, la population est prévenue pour qu'elle puisse augmenter l'apport en eau pour les cultures. Dans le cas contraire, c'est-à-dire une menace d'inondation, la communauté est appelée à adopter des structures pour éviter l'excès d'eau au niveau des cultures. Des activités relatives à la pêche se résument sur la préservation des écosystèmes marins et côtiers comme le récif et les mangroves. Des appuis techniques et matériels sont également apportés.

b. Projets proposés

i. Création de réservoirs souterraines

Réaliser des ouvrages de rétention d'eaux adaptées (bassins de rétention, impluvium etc.) pour valoriser le secteur de l'irrigation. La technique ASR est largement utilisé dans des pays arides tels que l'Australie. Le système consiste à la mise en place d'un système de rétention d'eau, puis cette ressource est préalablement filtrée pour être directement enfoui dans la nappe phréatique par un système de forage. Cette ressource pourra ensuite être réutilisée par un autre système de forage durant la période sèche.

Tableau 19. Coût indicatif de la mise en place d'un système de stockage et de réutilisation dans un réservoir aquifère

Désignation	Valeur	Unité
Mise en place de conduite d'irrigation	6 500	USD par ha
Installation de puits d'injection	50 000	USD par puits
Construction de barrage d'un volume de 40 000 000 m ³	22 239 000	USD
Construction de barrage d'un volume de 20 000 000 m ³	9 850 000	USD
Modification d'un puits existant	15 000	USD
Durée de vie de barrage	50	Années
Coût de maintenance et d'exploitation du barrage	4 478 000	USD (2% du coût de la construction)
Total	36 638 550	USD

(Source. Adapté du coût potentiel d'un système en Iran, Niazi *et al.*, 2014)

Ce type de système est à mettre en place au niveau de Betioky Sud et d'Ejeda. Selon les résultats de l'étude, une moyenne annuelle des eaux de ruissèlement dans ces zones présente une forte proportion d'eau exploitable. Les résultats ont également ressorti l'irrégularité de cet approvisionnement dans le temps. C'est pour cela, qu'il est nécessaire de mettre en place des systèmes de stockage de l'eau dans des zones souterraines pour une réutilisation dans une période future.

9. 3. 2. Région Anosy

a. Programmes et structures existants

Le DREAH Anosy a déjà prévu avec le ministère de tutelle de mettre en œuvre les projets suivants :

- Système d'eau à moyenne échelle : Alimentation en Eau Potable par Gravitaire (AEPG): 06 ; Alimentation en Eau Potable par Pompage Solaire (AEPPS)
- Système d'eau à grande échelle: Alimentation en Eau Potable par système hybride de la ville d'Amboasary
- Réhabilitation pipeline Mandrare-Sampona
- L'installation d'un tunnel d'acheminement d'eau depuis la rivière Efaho jusque dans l'Androy
- Le captage d'eaux depuis la rivière Tarantsy dans l'Anosy jusqu'à Ambovombe
- Construction/réhabilitation des points d'eau forages/puits équipés des PMH (Pompe à Motricité Humaine): 295
- Redynamiser les CPE et Rehausser la capacité de gestion des Fermiers du système au service
- Réunion de Sous Cluster WASH au niveau regionale
- Suivi de niveau de l'eau dans le système de captage et de la qualité de l'eau par GEWS (Groundwater Early Warning System)
- Vulgarisation du système usage multiple d'eau

b. Projets proposés

- i. **Approvisionnement en eau à multiple usage par le captage des eaux de ruissèlement au niveau des ouvrages d'assainissement sur la RN13 (Source: Rasolofonirina, 2019)**

Le captage des eaux de ruissèlement est une étape importante pour la valorisation des eaux de surface. Le stockage de ces ressources dans des réservoirs permet de valoriser les eaux de ruissèlement sur une période plus longue. Ce projet de captage des eaux de ruissèlement sur la RN13 est un projet pilote qui pourra être dupliqué au niveau de plusieurs routes nationales dans cette axe sud de Madagascar.

Ce projet consiste à mettre en place 2 réservoirs REEPS de 20 m³ de chaque, alimentés par 27 mares, qui servira de station de traitement physique de l'eau. L'eau obtenue pourra être utilisée par les ménages après traitement par ébullition ou l'utilisation de Sur'Eau pour sa potabilité. Cette ressource pourra être directement utilisée pour l'approvisionnement en eau des bétails et l'irrigation. La durée de vie de ce système est estimée à 50 ans (Rasolofonirina 2019) qui sera une solution d'adaptation sur le moyen et long terme. Le coût du projet sur la RN13 est de 195 175 000 Ar soit 51 008 USD.

Tableau 20. Coût de réalisation du système de stockage des eaux de ruissèlement

Désignation	Unité	Qte	PU (10 ³ Ariary)	Montant en (10 ³ Ariary)	Montant en USD
Construction de marre	Pièce	21	6 375 000	133 875 000	34 808
Réhabilitation et entretien marre	Pièce	6	2 550 000	15 300 000	4 050
Construction de réservoir REEPS	Pièce	2	23 000 000	46 000 000	12 150
Montant total				195 175 000	51 008

(Source. Adapté de Rasolofonirina, 2019)

9. 3. 3. Région Androy

a. Programmes et structures existants

i. Projets d'adduction d'eau potable

Des projets d'adduction d'eau potable sont prévus pour la Région Androy par le DREAH Androy et le MEAH :

- Mise à niveau du pipeline d'Amputaka
- Conversion de toutes les stations de pompage thermiques existantes (5) en solaire
- Construction de 3 nouvelles stations de pompage, doublement des anciennes conduites sur 50 km pour répondre aux besoins en eau croissant des populations desservies
- Construction d'une nouvelle extension vers Faux Cap d'une longueur de 40 km, portant à 180 km le linéaire de pipeline primaire
- Construction de 19 réseaux de distribution secondaires alimentant les communautés
- Construction Pipeline Mandrare (en cours), Construction pipeline BEMAMBA SATRA (En perspective) – Andalantanosy commune Antanimora (DREEH Androy, 2019)

ii. Alimentation en Eau dans le Sud (AES)

L'AES est un organisme de l'Etat établi pour résoudre le problème de distribution d'eau potable dans le Sud ; soit par la réalisation des différents travaux d'adduction d'eau (forage, puits, etc....), soit par l'approvisionnement en eau potable de la population par l'exploitation des centres A.E.P, Pipe-line, et des Camions Citernes d'eau. Cet organisme est sous tutelle technique du Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène pour réaliser la politique de l'Etat en matière d'approvisionnement en eau potable, d'assainissement et d'hygiène dans la partie Sud de Madagascar. Son rôle est de réaliser des points d'eau villageois d'une part, et à la gestion et exploitation des installations déjà existantes d'autre part, pour assurer l'approvisionnement en eau potable de la population à savoir: centre d'adduction d'eau AEP pour les zones cristallines (Antanimora, Tsivory, Andalatanosy, Isoanala, et Beraketa); camions citernes d'eau pour les zones sédimentaires (Ambovombe et ses environs); pipe-line pour les zones de Beloha et de Tsihombe.

b. Projets proposés

i. Approvisionnement en eau potable et irrigation dans la Commune d'Ambohimalaza, District Ambovombe, Région Androy (Rakotondrainibe, 2020)

Ce projet consiste à mettre en place un dispositif de stockage de l'eau souterraine du sous écoulement de la rivière sèche de Bemamba dans un réservoir enterré REEPS (Réservoir Enterré plein de Sable) de 100m³ alimenté par un barrage souterrain et par les mares de Mahatomtsy. Le système est prévu collecter 10m³/h d'eau et approvisionner la Commune d'Ambohimalaza en eau potable et en eau d'irrigation par un système gravitaire. Le coût du projet s'élève à 3 490 466 USD (Rakotondrainibe, 2020).

Tableau 21. Coût de réalisation du système d'approvisionnement en eau potable et irrigation dans la Commune d'Ambohimalaza

Désignation	Unité	Qte	PU (10 ³ Ariary)	Montant en (10 ³ Ariary)	Montant en USD
Etude préliminaire	Forfait	1	300 000	300 000	79 449
Travaux de construction de barrage et REEPS 18000m ³	Pièce	1	10 000 000	10 000 000	2 648 305
Travaux de construction de réservoir et de pompage solaire	Pièce	1	200 000	200 000	52 966
Conduite d'amenée et de distribution	Pièce	1	2 000 000	2 000 000	529 661
Réseau hydro-agricole	Pièce	1	600 000	600 000	158 899
Suivi et contrôle	Forfait	1	80 000	80 000	21 186
Montant total				13 180 000	3 490 466

(Source. Adapté de Rakotondrainibe, 2020)

IV- Limites et contraintes de l'étude

4. 1. Lenteurs administratives pour la collecte des données climatiques

Une démarche de demande de disponibilité des données climatiques et hydrologiques, ainsi que les scénarios climatiques dans les 3 Régions Anosy, Androy et Atsimo Andrefana, a été faite au niveau de la DGM. Les données hydrologiques représentent les débits et les hauteurs des cours d'eau. La DGM détient les données suivantes :

- Pluviométrie journalière, mensuelle et annuelle
- Température maximale, minimale et moyenne
- Projection climatique 2050 et 2080 : température et pluviométrie
- Débits de cours d'eau : disponibles pour certains sites et certaines périodes
- Hauteur d'eau : disponible pour certains sites et certaines périodes

En raison des lenteurs administratives, des démarches alternatives ont également permis d'obtenir des données climatiques concernant les zones d'intervention par l'intermédiaire des organisations œuvrant dans la Région Anosy ainsi que les différentes études dans les zones énumérées précédemment. Pour la pluviométrie par exemple, certaines stations sont gérées par des projets en cours et certaines sont gérées par des institutions publiques et privées travaillant dans ces zones. Parmi les parties prenantes détenteurs de données climatiques, les entités suivantes en font partie et ont fourni des données pour la réalisation de l'étude : le Programme DEFIs, l'ASECNA. D'autres institutions comme l'IFVM et l'UNICEF possèdent cette base de données mais son obtention nécessite une demande formelle au niveau du bureau central. Cependant, par souci de continuité spatiale et temporelle de données (Peu de stations pluviométriques sont fonctionnelles dans la région du Sud, si une station fonctionne, elle ne dispose que peu de données dans le temps) en plus du temps requis pour l'extraction des données météorologiques par bassin versant, la solution finale d'utiliser les données provenant de Worldclim a été prise. Ces types de données sont largement utilisés dans les travaux de recherches scientifiques.

4. 2. Indisponibilité des données climatiques en fréquence journalière et des données hydrologiques

Les données de précipitation et de températures ne sont pas disponibles en fréquence journalières pour les points d'extraction de données satellitaires disponibles. La base de données climatique (Historique et scénarii) produite par Worldclim est mensuelle. Concernant les données hydrologiques, les données de débits et de volumes des cours d'eau existants dans la zone d'étude ne sont plus actualisées et remontent à 1975. Les stations hydrométriques existantes ne sont plus fonctionnelles. Pour pallier à ces problèmes, la documentation a permis de retrouver des données climatiques et hydrologiques existants pour le Sud de Madagascar. Différentes études, dans le passé, ont partagé des données climatiques et hydrologiques concernant les 3 Régions d'Anosy, Androy et Atsimo Andrefana. Parmi les principaux documents consultés, le document « Fleuve et Rivière de Madagascar » (Chaperon *et al.*, 1993) contient des données sur le débit. Des recherches effectuées à l'Université de Tulear et d'Antananarivo contiennent des données sur les climats. L'analyse des extrêmes et des érosions des cours d'eau n'a pas été faite faute de données.

4. 3. Données non mises à jour sur les fleuves et les cours d'eau de Madagascar

Les données existantes sur les caractéristiques des fleuves de Madagascar ne sont pas à jour. La dernière recherche sur les fleuves à Madagascar en général et ceux dans le Sud en particulier remonte à 1993 par (Chaperon *et al.*, 1993). Les données sur la qualité de l'eau au niveau écologique, minérale et chimique des rivières et des lacs ne sont pas disponibles. Un rapport de recherche écrit par Arnaud en 2016 intitulé « Accès à l'eau dans le Grand Sud de Madagascar : évaluation du potentiel hydrogéologique au niveau des zones d'intervention de l'ONG AVSF projets : Zoloke, Sohavelo et Fanantenana. » existe mais très limités par rapport à l'ensemble de la zone d'étude. Concernant les données utilisées sur la qualité de l'eau et la profondeur de la nappe utilisées dans la présente étude, ces données doivent être confrontées par des recherches plus approfondies. Les enquêtes réalisées sur terrain semblent ne pas donner les mêmes informations. Par ailleurs, les superficies et les volumes disponibles ne sont pas disponibles et la carte hydrogéologique n'est pas détaillée. Une des perspectives de cette étude serait de modéliser le débit en eaux souterraines suivant les scénarii de changement climatique.

V- Recommandations

Les conséquences sur les territoires des changements climatiques sont variables dans leurs expressions comme dans leurs effets, et les territoires sont inégaux face à ces variations climatiques en termes d'exposition aux effets (fonction de facteurs physiques, sociaux, économiques, culturels, politiques, etc.) comme en termes de capacité de réponse (capacité d'appréhension, d'anticipation, de réparation, etc.). La gestion locale de l'adaptation aux effets des changements climatiques semble pouvoir venir accentuer certaines de ces disparités entre territoires, mais certaines initiatives de « mise en commun » et de coopération horizontale s'observent également autour de ce nouvel enjeu d'action territoriale. Il est important de réduire les « disparités régionales » et de renforcer les collaborations entre les partenaires. La gestion locale des effets du changement climatique doit renforcer les mécanismes de coopération et de solidarité territoriale et non d'alimenter des dynamiques de concurrence à l'œuvre entre territoires et les institutions. Théoriquement, la mise en œuvre de politiques d'adaptation aux changements climatiques peut contribuer à alimenter des mécanismes de redistribution, de transfert financier et technologique et de partage d'expériences. Et c'est à travers ces échanges que de réelles coopérations naissent et se renforcent. Le changement climatique peut être l'occasion de renforcer des coopérations interterritoriales existantes, notamment autour du partage d'instruments (comme les observatoires ou les systèmes de veille et d'alerte), et de faire émerger des coopérations intra-territoriales (à l'échelle d'une ville ou d'une région) autour de questions transversales réunissant une pluralité d'acteurs locaux, formant des espaces d'échanges nouveaux. Cela commence par l'étude de l'existant, le diagnostic de la situation actuelle/des scénarii futurs qui eux-mêmes débutent par l'échange de données et le partage des expériences sinon, on restera dans un cercle vicieux d'éternel recommencement.

VI- Messages-clés pour les décideurs

L'étude sur la vulnérabilité en ressources en eau face au changement climatique dans les 3 Régions du Sud de Madagascar : Anosy, Androy et Atsimo Andrefana montre une insuffisance des ressources disponibles pour répondre aux besoins de la population en eau domestique, eau agricole et eau pastorale. Il est important de noter que les besoins en eau agricole dans ces 3 Régions sont de l'ordre de 90% des besoins totaux. Les scénarios climatiques démontrent également une réduction de ces ressources entraînant une vulnérabilité de la population pour le moyen terme. Afin de mettre en place une résilience au changement climatique dans le secteur eau, les mesures d'adaptation suivantes sont proposées :

- Renforcement de politique de protection des ressources en eau au niveau national par la mise en place et/ou le renforcement :
 - Structure de suivi et de gestion des ressources en eau disponibles
 - Etude approfondie de la ressource en eau souterraine
 - Mise à disposition de données scientifiques à jour relatif à l'eau
 - Concertation intersectorielle sur la gestion et la protection de la ressource en eau
 - Renforcer la protection de l'environnement en considérant le GIRE dans la protection des ressources en eau
- Utilisation rationnelle des ressources en eau :
 - Réduction des besoins en eau agricole par l'utilisation de techniques améliorées, l'implication du secteur privé et redéfinition des zones agricoles et des activités prioritaires
 - Assurer la durabilité des projets existants de protection des ressources en eau contre l'érosion éolienne, d'exploitation durable des eaux de surface et souterraines pour l'adduction d'eau potable et d'irrigation
 - Protection et maintenance des ouvrages existantes
- Mise en place d'infrastructures de gestion efficiente des ressources en eau disponibles
 - Mise en place de barrages hydroélectriques pour l'adduction d'eau potable, l'irrigation et l'approvisionnement en énergie électrique
 - Mise en place de système ASR pour le stockage souterrain des ressources en eau et son utilisation pendant les périodes futures
 - Mise en place de structure de collecte d'eau de ruissèlement au niveau des routes nationales
 - Considérer les alternatives de forages dans les zones arides
- Renforcement de capacité pour l'efficience de l'IEC au niveau national
 - Application des lois, codes et réglementation relatifs à l'eau
 - Mode de gestion des infrastructures et des comités d'eau
 - Changement de comportement dans l'utilisation et la gestion des ressources en eau
 - Mettre en place un système de suivi périodique des ressources en eau

VII- Conclusion

L'objectif de cette étude a été d'évaluer la vulnérabilité en ressource en eau dans les trois régions du Sud de Madagascar à savoir la région Atsimo Andrefana, Anosy et Androy. Une synthèse bibliographique a été préalablement menée dans l'optique de se familiariser avec la zone d'étude et de réactualiser les données existantes sur le climat et les ressources en eau. Une modélisation hydrologique suivant les conditions climatiques actuelles et celles prévues suivant les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 en 2030, 2050 et 2080 a été réalisée. A priori, un déséquilibre est notable notamment concernant les écoulements de surface avec des étiages parfois sévères et une salinisation des eaux de surface et souterraine (qualité des eaux). Ce phénomène se manifeste par des retards des périodes de crues, liés à l'intermittence des pluies.

L'analyse hydrologique a montré que les besoins en eau agricole sont les plus importants. Les offres (eaux de surface et eaux souterraines) n'arrivent pas à combler ces besoins plus particulièrement dans les scénarii de changements climatiques futurs c'est-à-dire les projections. A l'horizon 2030 et 2050 les résultats ont mis en lumière la relation entre le climat, l'hydro-système et la pression anthropique, à travers un bilan hydrique à l'échelle globale. Il a ainsi été déduit que la baisse observée des volumes écoulés et infiltrés par rapport à la normale climatique (1990-2018) s'expliquait par une diminution des précipitations moyennes annuelles et une augmentation de l'évapotranspiration, entre les périodes 2021–2050 à l'échelle régionale. Certainement, les demandes continueront à être croissantes. Rien qu'à regarder la situation actuelle dans le Sud sur l'incapacité de planter due au retard voire au manque de pluies, cela devrait alerter les acteurs et les autorités compétentes sur les mesures et prises de décision à prendre.

L'agriculture pluviale qui est la pratique dominante des activités économiques dans la région, basée sur la production de subsistance est déjà affectée par la variabilité du régime climatique actuel et sera encore plus dans le futur. Les zones cristallines se trouvant beaucoup plus à l'intérieur du continent sont les moins épargnées selon l'analyse du fait principalement de la qualité d'eau et de l'existence de la nappe (Eaux souterraines). Des mesures ont été proposées pour se préparer à court/moyen termes ce fléau qui est déjà en train de sévir dans le Sud. Une solution parmi les projets présidentiels a été de rediriger le fleuve Efaho pour irriguer les zones inondables d'Amboasary Atsimo et d'Ambovombe. Pour commencer, les auteurs incitent les responsables compétents à pousser la connaissance sur l'origine et l'évolution de la salinité de la nappe superficielle via des études géochimiques, d'imagerie, des SIG et de la modélisation approfondie sur les eaux souterraines.

Les autres études faites au niveau des secteurs économique et social permettront de renforcer les mesures d'adaptation au changement climatiques dans les 3 Régions d'Anosy, Androy et Atsimo Andrefana. Aussi, les plans et les mesures d'adaptation au changement climatique seront identifiés au niveau systémique sur des bases scientifiques. L'ajustement du plan national d'adaptation pour les 3 Régions du Sud de Madagascar permettra ainsi de préparer la zone la plus vulnérable du pays face aux impacts du changement climatique sur le moyen terme.

Références bibliographiques

- Andrianarisoa, O. M. (2005). Étude de gestion intégrée des ressources en eau des hauts bassins du Mandrare. Université d'Antananarivo. Faculté des Sciences - Département de Physique.
- Banque Mondiale. (2015). *Diagnostic systématique de pays: Madagascar. Pour un dialogue sur les enjeux de développement*, Banque mondiale, 137 p.
- Benjamin B., Ndiaye C.I & Slaviero F. (2013). *Mission FAO/PA d'évaluation de l'insécurité alimentaire à Madagascar*. FAO et PAM, 75 pages.
- BNGRC. (2016). *Commission Urgence Grand Sud de Madagascar, Plan de réponse stratégique à la sécheresse prolongée (2016 – 2017)*, Union Européenne/ ISAC/ PAM, OCHA, Antananarivo, 19p.
- Chaperon, P., Danloux, J. & Ferry L. (1993). *Fleuves et Rivières de Madagascar (Ony sy renirano eto Madagasikara)*. Monographie hydrologique 10, Orstom Editions, 883p.
- Charmoille, A. (2016). *Accès à l'eau dans le "Grand Sud" de Madagascar évaluation du potentiel hydrogéologique au niveau des zones d'intervention de l'ong avsf projets : Zoloke, Sohavelo et Fanantenana*. [Rapport de recherche] AVSF. 2016. ffhal-01873112v1f.
- CPGU. (2019). *Présentation des résultats d'étude des impacts économiques et budgétaires des catastrophes à Madagascar et de proposition de recommandations au développement de stratégie nationale de protection financière et de gestion des impacts budgétaires des catastrophes*, CPGU, visité le 20 Décembre 2020, <https://www.primature.gov.mg/cpgu/index.php/2019/06/03/presentation-des-resultats-detude-des-impacts-economiques-et-budgetaires-des-catastrophes-a-madagascar-et-de-proposition-de-recommandations-au-developpement-de-strategie-nationale-de-protecti/>.
- CREAM. (2013). Monographie de la Région Androy. <https://creamnet.files.wordpress.com/2020/03/monographie-region-androy.pdf>.
- CREAM. (2013). Monographie de la Région Anosy. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/mg_mef_monographie-region-anosy_2014.pdf.
- CREAM. (2013). Monographie de la Région Atsimo Andrefana. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/mg_mef_monographie-region-atsimo-andrefana_2014.pdf.
- DGM and RIMES. (2019). Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques à Madagascar.

- GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité*, Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, É.-U.
- GIEC. (2014) *Changements climatiques 2014, Rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs*. GIEC. visité le 20 Décembre 2020, < https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf>.
- GIEC. (2013) Glossaire [Planton, S. (coord.)]. Dans: *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.
- Grouzis M., Lasry F., Milleville P. et Razanaka S. (2005). « Dynamiques de la déforestation ». Dans Lasry F. *et al.* (éd.) : *Environnement et pratiques paysannes à Madagascar*. Paris, IRD Éditions. Coll. Atlas Cédérom.
- Harris, I., P.D. Jones, T.J. Osborn, and D.H. Lister (2014). *Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset*. *International Journal of Climatology* 34, pp.623-642.
- Helene D. (2011). Perceptions et stratégies d'adaptation paysannes face aux changements climatiques à Madagascar Cas des régions Sud-ouest, Sud-est et des zones périurbaines des grandes agglomérations. Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières. AVSF.
- INSTAT. (2011). Enquête périodique auprès des ménages 2010 : rapport principal.
- IPC. (2020). Analyse de l'insécurité alimentaire aiguë et de la malnutrition aiguë de l'IPC de Octobre 2020 à Avril 2021.
- IPCC. (2020). A propos du GIEC, InterGovernmental Panel on Climate Change, visité le 20 Décembre 2020, < <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>>.
- Matangison, H. G. (2008). *Étude d'un terroir villageois: l'exemple du village de Tandroka Anja Commune Rurale d'Ankazoabo*. Université de Tuléar - Faculté des Lettres et des Sciences Humaines et Sociales. Département Géographie.
- MEEH et UNICEF. 2020. *Bulletin de monitoring de la sécheresse dans le Grand Sud de Madagascar*. Bulletin N°13. 21 Novembre au 20 Décembre 2019.
- MEED. (2019). *Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNA) Madagascar*. Antananarivo, Madagascar.
- MESUPRES, MEEFM AND PARRUR. (2015). *Plan directeur de la recherche sur l'environnement lié au changement climatique 2015 – 2019*, MESUPRES, 64 pages.

- ONUDI. (2015). *Projet d'Accès aux Marchés pour les Produits Agroalimentaires et du Terroir (PAMPAT)*, ONUDI.
- PNUD. (2019). *Évaluation finale UNDAF 2015-2019 Madagascar*.
- Rabemanana V., Violette S., De Marsily G., Robain Henri, Deffontaines B., Andrieux P., Bensimon M., Parriaux A. (2005). Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar. *Journal of Hydrology*, 310 (1-4), 143-156. ISSN 0022-1694
- Rabemananjara, Z.H., Rasoloarinoro, L., Razafindrianilana, T. (2015). *Mobilisation des connaissances locales sur la vulnérabilité et des options d'adaptation avec focus sur les services écosystémiques dans la région Atsimo Andrefana*. Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Raholijao N., Ramiandrisoa V. (2007). Tendances climatiques observées à Madagascar au cours des cinquante dernières années (1955-2005) et changements climatiques futurs. Service des Recherches Appliquées, Direction Générale de la Météorologie.
- Rakotondrabe M., Randrianarivelo D. (2017). *Analyse de la vulnérabilité et de l'adaptation des communautés locales dans l'extrême Sud de Madagascar dans le secteur de l'eau à usage multiple*. Rapport technique.
- Ranaivoarisoa, H. & Ramanananarivo, S., Ramanananarivo, R. & Faharano, M. & Rakotoarisoa, L. (2018). *Le carmin, sous-produit de l'Opuntia ficus indica pour un développement durable à Madagascar*. 10.13140/RG.2.2.23896.39682.
- Ran'Eau Malagasy. (2019). Rencontre d'échanges et d'information - ONG Ran'Eau.
- Randrianasolo J. (2006). *Le processus d'insécurisation foncière dans l'aménagement de la plaine de la Taheza. District de Betioky Sud, Région Sud-ouest de Madagascar*. Mémoire de DEA. École Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo. 64p.
- Ranjatson P., Rakoto Ratsimba H. (2015). *Étude de vulnérabilité et identification des options d'adaptation avec focus sur les services écosystémiques dans la Région Atsimo Andrefana*. Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement (PAGE)-GIZ.
- Rasolofoniaina J. D. (2014). Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement de l'Agence de Bassin du Sud – Ouest.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V. et al. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. Vol.109, no.33 <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- Serele, C. (2012). *Cartographie de la salinité de l'eau des forages Madagascar*. UNICEF Madagascar.

- Tadross M., Randriamarolaza, L., RABEFITIA, Z. & ZHENG K.Y. (2008). *Climate change in Madagascar : recent, past and future*. Washington DC: World Bank. 17 p.
- TMD. (2011). *Projet d'adduction d'eau potable et d'appui à la maîtrise d'ouvrage de la Commune d'Itampolo pour la mise en place d'un service public de l'eau*. Pré-étude technique et diagnostic. Programme hydraulique « Plein Sud », Madagascar, Région Atsimo Andrefana, Tuléar II, mai 2011. 24p.
- UN. (2016). Présentation des cibles et des indicateurs mondiaux de l'ODD 6. Travail en cours– version 20 Avril 2016.
- UNICEF. (2016). *Les Objectifs du Développement Durable (ODD)*. UNICEF. Visité le 20 Décembre 2020, <https://www.unicef.fr/sites/default/files/fiche_thematique_odd.pdf>.
- Van Gameren V., Weikmans R. & Zaccai E. (2014). 'II. Dimensions sociales du risque climatique'. Valentine Van Gameren éd., *L'adaptation au changement climatique*. Paris, La Découverte. « Repères ». p. 23-38. Disponible sur <https://www.cairn.info/l-adaptation-au-changement-climatique--9782707174697-page-23.htm>.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. *et al.* (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* vol.109, no.5 <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Vautravers E. & Ravelomandeha F.M.P. (2012). *Étude des systèmes agraires. District de Betioky Atsimo, Communes de: Ankazomanga, Maroarivo, Beantake, Masiaboay, Sakamasay*. Technical report, ACF.
- Volckaert M. (2014). *Exploration of the spiny forest*. Mis en ligne le 11 mai 2014, Disponible sur <http://www.wwf.mg/?221090/Exploration-of-the-spiny-forest#>.
- WWF. (2010). *Témoignages de Madagascar, Changement climatique et modes de vie ruraux*. WWF, 30 p.
- WWF. (2011). *La vulnérabilité de quelques espèces terrestres de Madagascar au changement climatique*. WWF. 26 p.

Annexes

Annexe 1 : Description des Bassins Versants

- **Bassin du Mandrare :** La rivière de Mandrare prend source à partir de Ranomainty, traversant les zones Est de Beraketa et Imanombo, longent la partie orientale de la région selon une direction globalement Nord-Sud jusqu'à la mer. Plusieurs petits affluents de la rive droite du Mandrare qui prennent naissance dans le Nord du district d'Ambovombe, s'écoulent globalement d'Ouest en Est : Sakamahaso, Ikonda, Besatra, Bamanda et Ikoroma. Ils drainent les eaux de pluies et sont pour la plupart à sec pendant la saison sèche.
- **Bassin du Manambovo :** La rivière Manambovo prend sa source au Nord d'Antanimora dans la zone Ouest d'Andalatosy vers 400 à 500m d'altitude. Manambovo s'écoule globalement depuis sa source selon une direction Nord-Sud avant de bifurquer dans le Sud-Est au niveau de Tsihombe jusqu'à la mer. Les cours d'eau qui le constituent n'ont pas d'écoulement superficiel.
- **Bassin du Menarandra :** La rivière Menarandra prend naissance à l'Ouest d'Isoanala au Nord de Beraketa dans le massif du Tsikoriry vers 800m d'altitude. S'écoulant du Nord-Est vers le Sud-Ouest, il reçoit en rive gauche au niveau de Bekily, la Manantanana et, plus au Sud, la Menakompy. Il passe par Tranoroa et longe ensuite les limites Ouest des communes de Beloha et Marolinta jusqu'à son embouchure. Ses nombreux petits affluents ne coulent que pendant la saison des pluies, seul son principal affluent, la Menakompy, conserve plus ou moins un écoulement permanent toute l'année.
- **Bassin de la Linta :** La rivière Linta est une rivière temporaire, sèche entre Avril et Décembre. Elle prend source dans la région de Fotadrevo vers 520 m d'altitude. Elle se dirige du nord-est vers le sud-est allant de Fotadrevo vers Androka. La rivière est formée par 3 principaux confluent : la Linta, le Manakaralahy et le Manakaravavy. La ville d'Ejeda possède une station hydrologique mesurant le débit et la hauteur d'eau.
- **Le bassin de l'Onilahy :** Le fleuve Onilahy est constitué par la réunion de l'Isoanala, de l'Ihazofoty, du Mangoky et de l'Imaloto. Le fleuve prend sa source sur le Mangoky provenant massif de l'Ivakoany, vers 1 300 m d'altitude. L'Onilahy se dirige du Sud au Nord, jusqu'à Betroka. Après Betroka, la géographie de l'Horombe dévie le Mangoky vers l'Ouest puis vers le Sud-Ouest. La formation géologique du bassin de l'Onilahy se situe sur un socle sédimentaire et est composée de plateaux calcaires. Le fleuve Onilahy se déverse vers le nord par le confluent Imaloto. Elle se déverse principalement venant de l'Ihazofotsy et l'Isoanala du nord au sud pour se déverser dans le Canal de Mozambique dans la Baie de Saint-Augustin.
- **Le bassin de Fiherenana :** Il est constitué géologiquement de la formation gréseuse de l'Isalo et des formations gréseuses calcaires et marno-calcaires du jurassique, du crétacé et de l'éocène. Le fleuve Fiherenana se déverse dans le Canal de Mozambique. Une station hydrologique a été opérationnel dans la station de Mahabo.

Annexe 2. Stockage de la dépression

Type de surface	Coefficient
Surfaces imperméables	0.002-0.004
Pelouses	0.004-0.008
Pâturages	0.008
Litière forestière	0.012

(Source. Adapté de ASCE, 1992)

Annexe 3. Caractéristiques du sol

Classe selon la texture du sol	K	Ψ	ϕ	FC	PF
Sable	0.187	0.076	0.437	0.062	0.024
Sable limoneux	0.046	0.094	0.437	0.105	0.047
Limono-sableux	0.017	0.170	0.453	0.190	0.085
Limon	0.005	0.138	0.463	0.232	0.116
Limono-limoneux	0.010	0.263	0.501	0.284	0.135
Limon argilo-sableux	0.002	0.341	0.398	0.244	0.136
Limon argileux	0.002	0.326	0.464	0.310	0.187
Limono-argileux	0.002	0.419	0.471	0.342	0.210
Argile sableux	0.001	0.372	0.430	0.321	0.221
Argile limoneux	0.001	0.450	0.479	0.371	0.251
Argile	0.000	0.496	0.475	0.378	0.265

(Source. Adapté du tableau de Rawls, W.J. *et al.*, (1983). J. Hyd. Engr., 109:1316).

Avec :

K = conductivité hydraulique saturée, mm/hr

Ψ = hauteur d'aspiration, mm.

ϕ = porosité, fraction

FC = capacité du champ, fraction

PF = point de flétrissement, fraction

Annexe 4 : Coefficient de rugosité de Manning pour la couverture du sol

Surface	n	Surface	n
Asphalte lisse	0.011	Sols cultivés	
Béton lisse	0.012	Couverture de résidus < 20	0.06
Revêtement en béton ordinaire	0.013	Couverture de résidus > 20	0.17
Bon bois	0.014	Plage (naturelle)	0.13
Brique avec mortier de ciment	0.014	Herbe	
Argile vitrifiée	0.015	Courte, prairie	0.15
Fonte	0.015	Dense	0.24
Tuyaux métalliques ondulés	0.024	Herbe des Bermudes	0.41
Surface en moellons de ciment	0.024	Bois	
Sols en jachère (sans résidu)	0.05	Broussailles légères	0.4
		Sous-bois dense	0.8

(Source. Adapté de Cuen, R. *et al.* (1996), Hydrology, FHWA-SA96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC)

Annexe 5 : Coefficient de rugosité de Manning pour les cours d'eau naturels

Valeurs du coefficient n de Manning				
Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moellons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moellons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,03
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,02	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,03	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,04	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,03
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,03	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,03	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,03	0,033
2) Propres, rives en ligne droite avec quelques herbes et pierres	0,03	0,033	0,035	0,04
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,04	0,045	0,05
4) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,04	0,045	0,05	0,055
5) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,04	0,045
6) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres, avec pierres	0,045	0,05	0,055	0,06
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,05	0,06	0,07	0,08
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,1	0,125	0,15

(Source. Adapté de Chow 1959)

Annexe 6 : Besoins en eau pastorale (Eau en Millier de m³)

Délimitations administratives		Unité Bovin Tropical	Besoin en eau (Millier de m ³)									
Région	District		% UBT	2015		2020		2030		2050		2080
			UBT	Eau	UBT	Eau	UBT	Eau	UBT	Eau	UBT	Eau
Androy	Ambovombe	30.0	146072	1.6	167982	1.8	222157	2.4	388553	4.2	898748	9.8
	Bekily	42.6	207020	2.3	238073	2.6	314851	3.4	550677	6.0	1273750	13.9
	Beloha	16.9	82205	0.9	94536	1.0	125023	1.4	218666	2.4	505789	5.5
	Tsihombe	10.5	51123	0.6	58791	0.6	77751	0.9	135987	1.5	314547	3.4
Anosy	Amboasary-Sud	26.3	95971	1.1	110366	1.2	194708	1.6	340546	2.8	787704	6.5
	Betroka	53.0	193161	2.1	222135	2.4	391892	3.2	685422	5.6	1585422	13.0
Atsimo Andrefana	Ampanihy	30.8	34583	0.4	39771	0.4	227853	0.6	398516	1.0	921793	2.3
	Benenitra	5.4	6063	0.1	6973	0.1	39948	0.1	69870	0.2	161613	0.4
	Betioky (sud)	20.1	22569	0.2	25954	0.3	148696	0.4	260071	0.6	601559	1.5
	Sakaraha	10.7	12014	0.1	13816	0.1	79157	0.2	138446	0.3	320233	0.8
	Toliara I	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	Toliara II	13.4	15046	0.2	17303	0.2	99131	0.2	173380	0.4	401040	1.0

Annexe 7 : Besoins en eau agricole (Eau en Millier de m³)

Délimitations administratives		Cultivée	Besoin en eau (Millier de m ³)				
Région	District	% Superficie	2015	2020	2030	2050	2080
Androy	Ambovombe	12.6	79217.1842	91099.7618	120479.431	210719.279	487406.506
	Bekily	22.2	139496.73	160421.24	212157.083	371064.066	858293.747
	Beloha	54.1	339543.962	390475.556	516403.907	903193.666	2089141.87
	Tsihombe	11.1	69638.1236	80083.8422	105910.878	185238.788	428468.581
Anosy	Amboasary-Sud	37.7	488003.319	561203.836	742192.061	1298098.54	3002580.77
	Betroka	34.7	449636.006	517081.424	683840.172	1196040.73	2766514.84
	Taolagnaro	27.6	357477.674	411099.339	543678.867	950897.73	2199484.2
Atsimo Andrefana	Ampanihy (Ouest)	10.0	106667	122667.05	162227.17	283736.34	656299.4
	Ankazoabo	10.2	108698.752	125003.565	165317.211	289140.842	668800.341
	Benenitra	3.3	35555.6667	40889.0167	54075.7233	94578.78	218766.467
	Beroroha	10.5	111746.381	128508.338	169952.273	297247.594	687551.752
	Betioky (Sud)	17.7	188952.971	217295.917	287373.844	502618.659	1162587.51
	Morombe	22.1	235683.276	271035.768	358444.795	626922.199	1450109.15
	Sakaraha	11.1	118857.514	136686.141	180767.418	316163.35	731305.046
	Toliara I	0.0	0	0	0	0	0
	Toliara II	15.0	160508.438	184584.704	244113.265	426955.635	987574.335

Annexe 8: Besoins en eau de la population (Millier de m³)

Délimitations administratives		Population		Besoin en eau (Millier de m ³)				
Région	District	Population 2015	% Population	2015	2020	2030	2050	2080
Androy	Ambvombe	123,398	14.9	771.2	886.8	1172.8	2051.3	4744.8
	Bekily	124,284	15.0	776.7	893.2	1181.3	2066.0	4778.8
	Beloha	394,556	47.6	2465.7	2835.6	3750.1	6558.9	15171.0
	Tsihombe	185,897	22.4	1161.7	1336.0	1766.9	3090.2	7147.9
Anosy	Amboasary-Sud	306,774	40.5	1343.5	1545.0	2043.2	3573.7	8266.1
	Betroka	215,330	28.4	943.0	1084.5	1434.2	2508.4	5802.1
	Taolagnaro	235,927	31.1	1033.2	1188.2	1571.4	2748.4	6357.1
Atsimo Andrefana	Ampanihy (Ouest)	176,823	11.9	2152.8	2475.7	3274.1	5726.4	13245.6
	Ankazoabo	51,575	3.5	627.9	722.1	955.0	1670.3	3863.4
	Benenitra	132,215	8.9	1609.7	1851.1	2448.1	4281.8	9904.1
	Beroroaha	73,975	5.0	900.6	1035.7	1369.7	2395.7	5541.4
	Betioky (Sud)	231,686	15.6	2820.7	3243.8	4290.0	7503.2	17355.3
	Morombe	349,984	23.6	4261.0	4900.1	6480.4	11334.3	26216.8
	Sakaraha	127,594	8.6	1553.4	1786.4	2362.6	4132.1	9557.9
	Toliara I	298,224	20.1	3630.8	4175.4	5522.0	9658.0	22339.6
	Toliara II	43,686	2.9	531.9	611.6	808.9	1414.8	3272.5

Annexe 9 : Note de vulnérabilité par type de nappes présentes dans les trois régions

Type de nappe	Qualité de la nappe	Profondeur d'ouvrage	Note qualité (/10)	Note profondeur (/10)
Nappe d'arène	Eau douce	4 à 5m	10	8
Nappe de sables côtières et dunes récentes	Eau saumâtre	1 à 5m	4	10
Nappe du quaternaire d'Ambovombe	Eau saumâtre	10 à 20m	4	4
Nappe de sable de plage	Eau douce à saumâtre, parfois salée	1 à 5m	5	10
Nappe de Jurassique	Eau saumâtre	Pas de données	4	5
Nappe du quaternaire ancien	Eau saumâtre	5 à 10m	4	7
Nappe de terrain volcanique quaternaire	Eau à faible minéralisation	5 à 20m	8	6
Non aquifère	Pas de données	Pas de données	5	5
Nappe de l'Isalo	Eau douce	50 à 150m	10	2
Nappe du crétacé	Eau douce	50 à 150m	10	2
Nappe de sable de plage	Eau douce à saumâtre, parfois salée	1 à 5m	4	10
Nappe de l'Isalo	Eau douce	50 à 150m	10	2
Nappe du quaternaire ancien	Eau saumâtre	50 à 150m	4	2

Tarissement des eaux de surface

Le climat du Sud est un climat aride. Le régime du cours d'eau varie en fonction de la fréquence des pluies : les crues, très fortes après les orages se tarissent rapidement ; les ruisseaux sont ainsi à sec la plupart du temps avec un bref écoulement dans la couche d'alluvions (Andrianarisoa, 2005). Cette instabilité est également remarquable durant les périodes de pluie où les écoulements peuvent être violents et destructeurs (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017). De plus, selon les mêmes auteurs, les caractéristiques géologiques et la morphologie du relief de la zone qui dictent cette large instabilité des écoulements.

A l'exemple du bassin versant de Mandrare, les premiers régimes ont un régime torrentiel dans la haute chaîne Anosyenne. Les rivières venues des chaînes beaucoup plus arrosées à couverture latéritique ont presque toujours de l'eau courante. Les pluies y sont plus fréquentes, avec des orages et des crachins qui tombent presque toute l'année (Andrianarisoa, 2005). En général, les problèmes des ressources en eau de surface sont la mauvaise qualité de l'eau et son insuffisance, surtout pendant la saison sèche. En plus, du fait de la persistance d'un certain tabou coutumier (Cas du Bassin versant de Mandrare), le prélèvement d'eau dans la rivière est interdit par la pratique de la coutume dans cette région (Andrianarisoa, 2005).

Mis à part la variation des saisons climatiques, les caractéristiques géologiques et morphologiques de la zone ont d'importants impacts sur l'instabilité des écoulements. Par exemple, Manambovo, Menarandra et Linta font partie de la deuxième catégorie des cours d'eau caractérisés par des écoulements permanents à leurs sources mais qui sont pratiquement à sec dès leur sortie des terrains métamorphiques durant la saison sèche. De même pour certaines zones du plateau Mahafaly localisées dans les Bassins supérieurs du fleuve Onilahy. Ces zones sont localisées dans les zones des plateaux cristallins dont les cours d'eau ont les mêmes caractéristiques de la deuxième catégorie décrite précédemment (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017).

D'après (TMD, 2011), le régime d'écoulement actuel dans le Sud n'est plus stable du fait de la variabilité des précipitations et de l'augmentation de la température. Le phénomène de tarissement des ressources en eau entraîne aussi l'ensablement du lit des rivières et augmente le risque d'inondation dans les zones vulnérables en période de crue. De plus, le rabattement du plan d'eau de surface peut entraîner la mise à découvert des fondations des ouvrages (Exemple : fondation du barrage, pile des ponts...) et le contournement ou la dérivation du tracé de l'écoulement.

Enfin, une autre menace importante à considérer est aussi la pollution des nappes due en partie aux déchets des entreprises de production de sisals dans la Région Anosy (cas par exemple du fleuve de Mandrare) (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017).

Tarissement des eaux souterraines et difficulté d'accès en eaux souterraines

Les ressources en eaux souterraines identifiées dans les régions du Sud sont constituées essentiellement par des nappes d'arènes, de socle et de fissure dans les zones cristallines ainsi que les nappes de sable (PNUD, 2010). La diminution et l'inégalité des répartitions de la pluviométrie mensuelle et annuelle modifient aussi les caractéristiques des eaux souterraines tant en quantité qu'en qualité. L'insuffisance des sources d'alimentation par infiltration des eaux entraîne la diminution des volumes d'eau stockés dans le sol et le rabattement de la hauteur piézométrique. La possibilité d'extraction ou de pompage sera ainsi réduite et le système mise en place peut être abandonné (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017). Or, l'exploitation excessive des eaux souterraines par des réseaux de forages très denses entraîne le rabattement des nappes et l'augmentation de la salinité de ces eaux (Andrianarisoa, 2005).

Insuffisance des débits exploitables des eaux souterraines

Les problèmes des eaux souterraines reposent sur l'exploitation des ressources et l'insuffisance des débits exploitables. La zone sédimentaire entraîne un approfondissement du niveau statique. L'exploitation de l'eau souterraine nécessite des sources d'énergie puissante. Les études menées par RASOLOFONIAINA en 2014, dans le cadre de l'élaboration du Schéma directeur de l'eau et de l'assainissement, montrent que les débits inférieurs à 1 m³/h ne sont représentés que dans les nappes perchées et en particulier pour celles des sables blancs entre Beloha et Ambondro au Sud. La majorité des ouvrages implantés dans le socle donne des débits inférieurs à 5 m³/h. Les formations sédimentaires dunaires de la façade Sud peuvent fournir en moyenne des débits compris entre 5 et 10 m³/h.

Qualité variable des eaux souterraines

RASOLOFONIAINA (2014) mentionne que les intrusions marines en zones côtières peuvent entraîner de fortes conductivités des ressources, les eaux de la nappe générale de la façade Sud issues des terrains dunaires sont qualifiées de mauvaises et tous les forages réalisés dans le socle ont mis en évidence une grande variabilité de la qualité physico-chimique de l'eau (de moins de 1 000 à plus de 30 000 µS/cm)⁵. Les études menées par (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017) ont évoqué que les communes situées dans l'extrême Sud de la région Androy (De Marovato à Ambovombe en passant par les communes comme Faux Cap ou Betanty, Anjampaly, Erada...) sont mauvaises. Les eaux souterraines dans la commune d'Itampolo sont de bonnes qualités. Pour les autres communes, la qualité est variable. Cependant, la hausse du niveau de la mer entraîne à elle aussi la dégradation de la qualité

⁵ Trois catégories ont été identifiées selon la conductivité de ces ressources (Charmoille, 2016):

- Les eaux de bonne qualité dont la conductivité est inférieure à 1 000 µS/cm
- Les eaux de moyenne qualité dont la conductivité est comprise entre 1 000 et 4 000 µS/cm,
- Les eaux de mauvaise qualité dont la conductivité moyenne supérieure à 4 000 µS/cm

d'eau souterraine (Rasolofoniaina, 2014). Ce phénomène touche particulièrement les zones littorales comme le cas de la commune d'Androka, d'Itampolo et des zones côtières du District de Tsihombe. Les nappes d'eau dans ces zones sont particulièrement vulnérables aux intrusions d'eau salée ou la remontée du niveau de la mer surtout en période de cyclone.

Décalage du calendrier cultural et des cycles de production : diminution de la production agricole

Les bouleversements climatiques ont des effets tangibles sur les activités agricoles et d'élevage. Les perturbations entraînent un décalage du calendrier cultural, et par conséquent, du cycle de production de certaines cultures. Les agriculteurs sont ainsi obligés d'attendre l'arrivée de la première pluie pour le semis ou la plantation. D'après (Rabemananjara *et al.*, 2015, dans la commune d'Antaly, la diminution de la production est évaluée jusqu'à 95% pour la culture de manioc, 40% du riz. Le décalage du calendrier cultural a aussi pour conséquence un vieillissement des jeunes plants de riz en pépinière. Les plants repiqués à partir de ces plantules âgées ont eu un tallage inférieur à la normale se traduisant par de plus faibles rendements (Benjamin *et al.*, 2013).

Réduction des superficies cultivées et perte de la fertilité des terres due à la sécheresse

Dans certaines communes disposant d'importants réseaux hydrographiques et d'infrastructures hydroagricoles comme la commune de Behaza considérée comme grenier à Riz du district de Betioky, les impacts remarquables des changements climatiques perçus par la population locale est la baisse considérable du niveau d'eau dans les canaux d'irrigation n'arrivant plus à irriguer la totalité des champs. En conséquence, la superficie cultivée s'est réduite jusqu'à moitié. De plus, dû à l'étiage des rivières, il faut doubler les efforts déployés dans le travail des champs en égalisant le niveau des champs avec celui de l'eau (Rabemananjara *et al.*, 2015). Selon Randrianasolo en 2006, la productivité reste faible car la maîtrise de l'eau n'est pas acquise de par l'insuffisance d'entretien (Destruction des ouvrages hydroagricoles après le passage du cyclone Gafilo en 2004) et l'impact des aléas climatiques.

Attaques d'insectes et invasion acridienne

Un autre phénomène extrême qui s'abat dans le Sud est le passage de cyclones et de vents forts. Les cyclones sont souvent accompagnés de fortes pluies entraînant d'importantes inondations et des dégâts sur l'agriculture. Par exemple, le passage du cyclone « Haruna » en 2013 a provoqué une perte significative des récoltes suite aux inondations et à l'ensablement des champs de culture. Les pertes sont évaluées à 70% de la production pour toute la région Atsimo Andrefana (Benjamin *et al.*, 2013). Par ailleurs, le passage de cyclone favorise les conditions de reproduction des criquets pour une période plus longue.

C'est ainsi qu'en mars 2013, juste après le passage du cyclone Haruna, la formation de bandes larvaires s'est généralisée (Benjamin *et al.*, 2013). Mis à part les impacts directs liés au changement du climat, les facteurs non climatiques tels que les maladies dues aux insectes et l'invasion acridienne viennent empirer la situation. L'essaim du criquet migrateur

malgache a contribué par exemple à une diminution notable de la production. Le riz, le maïs, l'arachide et le Niébé figurent parmi les principales productions les plus affectées (Rabemananjara *et al.*, 2015).

Insuffisance d'eau, des terrains de pâturage et amaigrissement et diminution du nombre de cheptel

Pour le secteur élevage, l'effet cumulé de la réduction de la précipitation et de l'insuffisance de pâturage a conduit à la diminution du cheptel bovin. Les enquêtes réalisées par (Rakotondrabe et Randrianarivelo, 2017) ont montré une augmentation de 8 à 11 mois d'indisponibilité en étangs d'abreuvement en 2016 contre 4 à 6 mois dans le passé. Par ailleurs, 76% des ménages enquêtés ont rapporté avoir senti la présence d'une famine bovine vers 2009 alors qu'auparavant, cela ne touchait que les humains.

Les principales causes ne sont pas seulement les facteurs climatiques mais également l'insécurité dans la zone (Rabemananjara *et al.*, 2015). La baisse des effectifs du cheptel provient de la mortalité élevée des veaux, des ventes pendant les périodes de soudure. D'autre part, l'invasion acridienne a aussi diminué les terrains favorables au pâturage car après le passage des criquets, les pâturages deviennent impropres à l'alimentation du cheptel et favorise le développement de parasitoses qui affectent la santé et la productivité des animaux. De plus, la mauvaise alimentation du cheptel due à la faible disponibilité et la mauvaise qualité du fourrage détériorent les conditions sanitaires des animaux déjà très précaires (Benjamin B. & Ndiaye C., 2013).

Diminution des captures journalières due aux vents violents et à la sécheresse

La zone littorale du Sud-Ouest est exposée principalement aux vents violents qui sont devenus plus fréquents et durent plus longtemps et aux dérèglements des précipitations (variation temporelle saisonnière et en quantité). Le secteur de la pêche, principal moyen de subsistance des villages du littoral, est aussi touché. Le nombre de jours de pêche et par conséquent des captures journalières diminuent. Cette activité est devenue une activité périodique plutôt que d'être une activité annuelle. Par ailleurs, si les pêcheurs Vezo sont réputés par leur faculté à prédire le temps grâce aux indicateurs tels que le vent, le mouvement des marées et les nuages, les changements qui se sont amplifiés ces dernières années ont faussé les données aidant à prédire le climat (Rabemananjara *et al.*, 2015).

Capacité d'adaptation face au changement climatique

Décalage du calendrier cultural

La majorité des cultivateurs attendent les premières pluies, même lorsqu'elles n'arrivent qu'au début du mois de Février ou Mars, pour semer le maïs et planter le manioc. D'autres prennent une solution d'ordre fictif car ils sèment le maïs à la période habituelle (Novembre-Décembre) pour « tenter la pluie », d'après leurs dires (Helene, 2011). Avec un retard de deux ou trois de l'arrivée des premières pluies, ces mêmes agriculteurs sèment une deuxième fois mais le problème de manque de semences se pose.

Extension des terrains de culture, défrichage et production de charbon

Selon la disponibilité de terre arable, certains ménages aménagent souvent les sols nus aux alentours du village, ou mettent en valeur des terres dans des zones plus lointaines. D'autres, plus fortunés, commencent à utiliser de matériels agricoles performants comme la charrue pour ameublir le sol. Les moins fortunés quant à eux empruntent ces matériels pendant les travaux agricoles. En conséquence du changement climatique et de la déviation de la date de l'arrivée des premières pluies, certains agriculteurs ont renoncé purement et simplement à toute culture de saison et se sont rabattus sur des activités de nature extra-agricoles, en essayant en premier lieu la fabrication de charbon (Helene, 2011).

Migration vers d'autres régions

Enfin, certaines personnes voire tout un ménage optent pour une solution extrême. Elles ont migré de façon temporaire ou permanente vers des zones jugées comme plus prometteuses, notamment, à Morondava, Majunga et Ambilobe ou dans les zones d'exploitations minières comme Sakaraha et Ilakaka (Rabemananjara *et al.*, 2015). Ce sont les jeunes hommes qui sont les plus concernés par la migration, ils effectuent des salariats agricoles ou de main d'œuvre minière. Plus de 50% des ménages résidents dans les trois Régions, à la recherche de nouvelles terres cultivables, de pierres précieuses, ou du moins, d'autres activités plus rentables, ont quitté la région (Ranjatson & Rakoto Ratsimba, 2015).

Consommation de cactus et réduction de la ration alimentaire

Si normalement la période de soudure débute au mois de Décembre, du fait de la diminution de la production agricole, elle commence en Septembre pour ne se terminer qu'en Avril (au lieu de Mars). Autrement dit, la production ne suffit que pour 4 mois dans l'année (Rabemananjara *et al.*, 2015). La quantité optimale des besoins quotidiens pour les adultes est de 925 g de riz décortiqué, durant la période de soudure, les populations locales ont dû changer cette habitude en prenant le manioc, le maïs et la patate douce, s'ils ont pu en stocker. En effet, selon (Vautravers & Ravelomandeha, 2012), dans le district de Betioky, les agriculteurs qui ont un surplus de production ne vont pas les stocker, mais préfèrent les vendre immédiatement. Les raisons en sont que les infrastructures de stockage (grenier traditionnel) sont absentes, les ménages ont un besoin immédiat de liquidités afin de rembourser les dettes contractées au moment du semis et la capitalisation rapide sous forme de bétail ou petit élevage (volaille). Dans le cas des communes à très faible production agricole comme Ampanihy, les ménages se nourrissent de jeunes feuilles de cactus et dont la consommation peut durer jusqu'à 4 mois (Rabemananjara *et al.*, 2015). Pendant les famines intenses, pour assurer leur subsistance, la population se nourrit de cactus, des « bonta » (tamarin mélangé avec de la terre) ou également de mangues. Le cactus portant le nom de « Raketa Gasy » fructifie en Décembre et l'autre type de cactus appelé « Raketa Vazaha » porte ses fruits de Janvier à Mai. Ces fruits de cactus, riches en apports alimentaires (des vitamines, des acides aminés, riches en glucides, des minéraux et des fibres) sont tout aussi riches en eau particulièrement apprécié dès le début de la saison sèche (Vautravers & Ravelomandeha, 2012). Dans le Sud de Madagascar, les cactus sont utilisés pour l'enclosure

de certaines cases d'habitation ; les tiges et les feuilles servent d'alimentation pour les bétails (Rabemananjara *et al.*, 2015). Cependant, les figues de barbarie (une autre appellation du fruit du cactus) sont constipantes et il ne faut en user que modérément (Soulaire, 1948).

Construction de puits pour l'abreuvement des animaux

L'abreuvement des troupeaux restent également posent aussi problème quand les rivières et les cours d'eau tarissent. Une solution plutôt éphémère (qui ne tient que de 2 à 3 mois) est de creuser des points d'eau à proximité des rivières taries servant de petits bassins pour abreuvoirs (Rabemananjara *et al.*, 2015). A part la consommation de feuilles de cactus, les bétails sont nourris d'euphorbe (*Euphorbia stenoclada* ou « Samanta ») (Volckaert, 2014). Malgré le manque d'informations sur les apports nutritifs de cette plante, les jeunes rameaux charnus fournissent à la fois les nutriments et aident à l'hydratation des animaux.

Capitalisation économique des cheptels

La maîtrise du risque saisonnier, une succession de bonnes et de mauvaises saisons, au gré des variations de pluviométrie, apparaît davantage sous la forme d'un stockage d'épargne et d'un capital naturel renouvelable. Durant les périodes « Asara » ou bonnes années, les paysans vendent leurs surplus et achètent des zébus avec le bénéfice dégagé. Cependant, durant les « Bain-tao » ou les mauvaises années, jusqu'à une période récente, ils décapitalisaient peu. Le stockage de liquidités issues des surplus de récoltes vendus les bonnes années apparaît comme plus sécurisé sous cette forme (Helene D., 2011).

Annexe 11 : Présentation du logiciel PCSWMM

Le logiciel PCSWMM (Personal Computer for Storm Water Management Model) est un programme permettant la modélisation de l'aspect des eaux pluviales au niveau quantitatif et qualitatif sur un territoire géographique déterminé. PCSWMM permet d'utiliser des fichiers de logiciels de système d'information géographique (SIG) et permet également d'effectuer des traitements de données SIG dans l'analyse des eaux pluviales d'une région donnée.

Le logiciel PCSWMM a la capacité de faire des analyses sur la variation des pluies en fonction du :

- Temps,
- Evaporation des surfaces d'eau,
- Interception et du stockage dans des réservoirs,
- Infiltration dans le sol non-saturé,
- Percolation et écoulement souterrain,
- Echange entre les eaux souterraines et
- Systèmes de drainage,
- Transport des ruissellements.

La réalisation de l'analyse requiert la paramétrisation des données des groupes sur les paramètres climatiques, sur la surface géographique de la zone, sur la situation de l'espace souterrain de la zone et sur le transport du ruissellement. Le degré de précision de la modélisation dépend de la disponibilité des paramètres géographiques et climatiques.

Equations de base du modèle

Le modèle SWMM est un modèle mathématique basé sur les équations de Barré de Saint Venant. Ces équations décrivent le ruissellement quasi-unidimensionnel dans un cours d'eau naturel ou construit de largeur $l(x)$.

Les équations de base de la modélisation sont les suivantes :

Equation 1 : Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(AU) = 0$$

Avec:

- $A(x,t)$: aire de la section droite de l'écoulement
- $U(x,t)$: vitesse moyenne de l'écoulement
- $h(y,t)$: hauteur d'eau à partir du fond $z=0$

Equation 2 : Equation de quantité de mouvement longitudinale

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial x}(hU^2) + gh\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Tx}{\rho}$$

Avec :

- $\tau_x(x,t)$: cisaillement appliqué au périmètre mouillé $P(x,t)$.

Equation 3 : Equation en z, donnée par l'équilibre hydrostatique

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g$$

Equation 4 : Equation de Manning

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

- Q : Débit
- n : coefficient de rugosité de Manning
- A : Superficie
- R : Rayon hydraulique
- S : Pente

Annexe 12 : Traitements d'images satellitaires et descriptions des classes d'occupations du sol

Des opérations de pré-traitements ont été réalisées pour corriger les distorsions géométriques et radiométriques des plates-formes et des capteurs du satellite Landsat 8. Les images ont été mosaïquées puis ont ensuite subi une classification orientée objet. C'est une classification d'images satellitaires opérant sur les regroupements de pixels contigus en se basant sur la valeur spectrale, la forme, la taille, le rapport longueur sur largeur etc., des objets à classer. Le principe est de proposer à l'opérateur une automatisation de l'interprétation visuelle réalisée par le photo-interprète. Le choix de l'algorithme s'est porté sur les SVM (Support Vector Machine) qui est une méthode de classification supervisée et non-paramétrique. Sur la base des cartes des observations recueillies sur le terrain et vu l'échelle de l'étude (étalée sur trois régions), les classes suivantes ont été retenues : Forêt humide, Forêt sèche, Savane (herbeuse et arborée), Mosaïque de culture, Plan d'eau et Sable.

- **Forêts humides** : Formations végétales principalement situées à la fin de l'épine dorsale de Madagascar et l'Est des chaînes Anosyennes. Elles appartiennent à l'écorégion de l'Est entre la côte Est de Madagascar et les hauts plateaux du centre de l'île, du niveau de la mer à 800 mètres d'altitude. C'est une forêt dense humide sempervirente. Localement, elles sont situées dans le parc d'Andohahela et de Tsitongambarika. Les principales rivières de la région Anosy (Est) prennent source dans ces forêts de montagnes. Ce qui lui confère le rôle de château d'eau ou de réservoir hydrique de la région de Fort Dauphin.
- **Forêts sèches** : Formations végétales appartenant dans les écorégions de l'Ouest et le Sud. Elles sont caractérisées par des broussailles caducifoliées ou des fourrés épineux allant de Ranopiso jusqu'aux limites nord et ouest de la préfecture d'Amboasary, à partir du niveau de la mer jusqu'à 800 m d'altitude. La forêt dense sèche constitue le climax de tout le domaine phytogéographique de l'Ouest. Les formations sèches sont composées de fourré sur calcaire, fourré sur latérite, fourré transition le long du Mandrare et de la forêt dense sèche proprement dite. Les Didiéracées sont toutes des plantes ligneuses fortement adaptées à la sécheresse, (épines, pour la plupart crassuléscentes) et dont les feuilles sont généralement caduques en saison sèche. Les niveaux de diversité biologique sont élevés au sein de tous les reliquats d'habitats naturels intacts. Elles comprennent également les forêts de transition qui ont des caractères intermédiaires entre deux écosystèmes : entre littorale et forêt sèche d'une part ou forêt sèche et forêt humide d'autre part.
- **Savane** : C'est une formation savanicole herbeuse. Cette formation est quelquefois parsemée de quelques arbres (Savane arborescente). La végétation est composée de plantes épineuses pouvant s'adapter à la sécheresse. La savane herbeuse est considérée comme le terme ultime de la dégradation du milieu par les perturbations liées aux activités humaines (Grouzis *et al.*, 2001). Elle est maintenue dans cet état par l'influence permanente de ces facteurs (feu, remise en culture).
- **Sable** : Formations de dunes côtières (dépôt de sédiments sur la plage) également visibles le long des principaux fleuves. Une grande majorité des éléments ensablent les rivières et les fleuves, et les particules fines sont véhiculées par le vent, accentuant davantage les mouvements des dunes de sables cette fois à l'intérieur du continent.
- **Plan d'eau** : Composée de lacs, d'étangs, de fleuves et de l'eau océanique.

- **Mosaïque de cultures :** Terrains de cultures dont les tailles des parcelles sont variables. La plupart du temps ces mosaïques sont entourées de haies de cactus. Le cactus constitue presque toutes les clôtures des champs de culture, donc une haie défensive, et joue également un rôle très important dans la conservation du sol contre le ravage occasionné par le vent dominant du Sud "Tiokatimo".

Coefficient de rugosité par type d'occupation du sol

Le coefficient de rugosité dépend de l'occupation du sol. Ce paramètre définit la vitesse d'écoulement du ruissèlement vers le point de drainage et à l'intérieur des cours d'eau. La formule relative à la vitesse d'écoulement est donnée par la formule de Manning.

Equation 5 : Equation de Manning

$$V = \frac{1}{n} Rh^{2/3} S^{1/2}$$

V : vitesse d'écoulement (m/s)

Rh : rayon hydraulique (m)

S : pente (m/m)

n : coefficient de rugosité de Manning

Le coefficient de rugosité de Manning dépend de plusieurs paramètres. Le tableau suivant donne les valeurs de ce coefficient de rugosité de Manning.

Valeurs de coefficients

Les paramètres utilisés pour la modélisation de chaque bassin versant dépendent du type de sol, l'occupation du sol et du type de conduite.

Tableau 22. Liste des paramètres et les coefficients

Paramètre	Type de surface	Valeur
Coefficient de stockage de la dépression	Pâturages	0.008
Coefficient de stockage de la dépression	Litière forestière	0.012
Coefficient de rugosité de Manning de la couverture du sol	Couverture de résidus < 20	0.06
Coefficient de rugosité de Manning de la couverture du sol	Plage (naturelle)	0.13
Coefficient de rugosité de Manning de la couverture du sol	Herbe dense	0.24
Coefficient de rugosité de Manning de la couverture du sol	Broussailles légères	0.4
Coefficient de rugosité de Manning de la couverture du sol	Sous-bois dense	0.8
Coefficient de rugosité de Manning des cours d'eau naturel	Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres, avec pierres	0.15

Annexe 13. Historique des grands projets liés à l'amélioration des services sur l'eau et sur le changement climatique dans le Sud

Le Grand Sud de Madagascar possède la plus faible moyenne de précipitation annuelle selon le BDEAH. Cette partie de l'île possède quelques cours d'eau mais présentent de nombreuses contraintes pour répondre aux besoins totaux grandissant en eau dans les 3 Régions d'Atsimo Andrefana, Anosy et Androy (SDEA 2015). L'augmentation des besoins entre 2015 et 2025 sera de plus de 350%, avec une forte proportion en besoins pour l'agriculture 78.42% en 2015, cela diminuera à 28.8 % si les nouveaux besoins seront majoritaires en 2025 (hydroélectricité) (SDEA AB Sud-Est). Des contraintes climatiques sont à considérer dans l'amélioration des services sur l'eau. Pour les eaux de surface, l'irrégularité des pluies et l'augmentation de l'évaporation impactent sur la disponibilité continue de l'eau et sur sa qualité. Dans la région Androy, l'approvisionnement en eau présente des problèmes de qualité d'eau due à la concentration des minéraux par l'évaporation de l'eau. Concernant les eaux souterraines, les contraintes résident dans la maîtrise de la quantité disponible au niveau de ces nappes. Selon les partenaires œuvrant dans la zone d'Atsimo Andrefana, des travaux de réhabilitation de puits ont été réalisés et malheureusement durant la période de sécheresse, les niveaux d'eau statique ont diminué jusqu'à l'assèchement des puits. Pour le cas d'Ampanihy, le forage desservant les besoins en eau potable de la population a connu une nette diminution du niveau statique de l'eau conduisant à des irrégularités du service d'approvisionnement et même l'arrêt de l'approvisionnement à cause de l'assèchement de la nappe. En termes de coûts, la vision actuelle sur le court terme et la considération de faibles coûts d'investissement limitent les technologies utilisables pour l'adduction d'eau potable en considérant les risques du changement climatique, l'amélioration de la qualité de l'eau et la construction de barrages d'irrigation. Selon des acteurs dans le secteur, la considération des approches sur le long terme permettrait l'utilisation d'investissement conséquent pour un avantage régulier et durable, plus pertinent pour le long terme. La valorisation des coûts d'investissement n'est également pas encore effective pour tous les projets œuvrant dans le Sud de Madagascar car certains projets d'adduction d'eau potable n'ont fonctionné que quelques mois pour des investissements conséquents. Cela est le cas pour l'adduction d'eau potable d'Ejeda par forage avec pompage avec des irrégularités au niveau de la maintenance et de la conception des ouvrages réalisés (profondeur des tuyaux de distribution visibles à la surface). Les contraintes économiques concernent également une création de dépendance aux services existants et la non-conformité des modes d'actions de certains acteurs. L'approvisionnement en eau ne considère pas tous les bénéficiaires mais une sélection est faite par rapport au profit généré. Certaines communautés ne sont pas desservies à cause de la faiblesse du profit généré par leur approvisionnement.

Face à ces contraintes, les partenaires techniques et financiers ont chacun leur mode d'action propre pour l'effectivité des actions implémentées dans le Sud de Madagascar. Le ministère MEAH a mis en place le « Cluster WASH » dans la Région Anosy pour regrouper les acteurs et parties prenantes du secteur. Pour le cas d'Unicef, elle apporte son soutien directement au niveau des DREAH pour réaliser les politiques du secteur et apporter des renforcements de capacité à la direction. Les projets du PNUD sont surtout axés sur les objectifs stratégiques du Plan National d'Adaptation au changement climatique.