



**Modélisation de l'offre et de la demande en eau dans un
contexte de changement climatique dans le bassin supérieur du
Nakanbé : application du modèle WEAP à la gestion intégrée
des ressources en eau**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER 2

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 30 juin 2020 par :

Alligouamé Vincent OUEDRAOGO (20170198)

Sous la direction de **Hamma YACOUBA**

Professeur Titulaire

Sous l'encadrement de **Dial NIANG**

Maître Assistant

Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)

et du maître de Stage : **Aley SAOUTO**

Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH)

Jury d'évaluation du Mémoire

Président du Jury : **Dr Malicki ZOROM**

Membres et Correcteurs : **Dr Babacar LEYE**

: **M. Roland YONABA**

Promotion [2019/2020]

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents Jean-Baptiste et Christine OUEDRAOGO : Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leurs procure bonne santé et longue vie.

A ma très chère épouse OUEDRAOGO/MASSIMBO Delphine Marie Prisca qui m'a soutenu tout au long de ce travail et à ma fille Rimwaogdo Marie Gloria qui a supporté mes absences.

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais abouti sans le soutien et la participation de toutes les personnes qui m'ont assisté dans sa réalisation. L'occasion me semble appropriée pour leur adresser tous mes remerciements et ma profonde reconnaissance. Il s'agit de :

- L'institut internationale de l'eau et de l'assainissement et l'ensemble du corps professoral et administratif de 2iE et particulièrement tous ceux qui ont contribué à notre formation ;
- Mon Directeur de mémoire Dr. Dial NIANG qui a suivi avec intérêt ce travail malgré ses multiples occupations. Ses conseils, encouragements, motivations et critiques toujours constructives nous ont guidé dans la rédaction du mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude ;
- Monsieur le Directeur Général des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) pour l'opportunité de stage qu'il nous a accordé et de sa disponibilité à nous accompagner tout au long de notre stage ;
- Messieurs YE OUEBABENI Ernest et SEDGA Koudougou Achille respectivement Directeur des Etudes et Travaux et Directeur des Opérations de Maintenance des Ouvrages Hydrauliques à la DGIH pour l'accueil et pour avoir facilité le déroulement du stage ;
- Monsieur Martin TANGA, chef de service suivi et exploitation à la DGIH pour sa disponibilité, ses conseils et l'appui technique à notre égard durant le stage ;
- Monsieur SAOUTO Aley, notre maître de stage, pour la qualité de son encadrement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il a porté à mes travaux.

Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel de la DGIH, pour leurs conseils pleins de sens, le suivi et l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux.

Nos remerciements vont également à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Sigles et abréviations

AEP	: Approvisionnement en Eau Potable
ANAM	: Agence Nationale de la Météorologie
CCI	: Climat Change Initiative
CRA	: Centre Régional AGRHYMET
DGRE	: Direction Générale des Ressources en Eau
DRAAHA-N	: Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydroagricoles du Nord
DRRAH-N	: Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques du Nord
ESA	: Agence Spatiale Européenne
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations « Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture »
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GWP	: Global Water Partnership
HEC-ResSim	: Hydrologic Engineering Center Reservoir System Simulation Model
INSD	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
IRAS	: Interactive River-Aquifer Simulation;
IRD	: Institut de Recherche et du Développement
LC	: Land Cover
LWD	: Land and Water Developpement
MAHRH	: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources halieutiques
MCG	: Modèles Climatiques Globaux
MEA	: Ministère de l'Eau et de l'Assainissement
MERIS	: MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MVR	: Méthode du Vecteur Régional
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONEA	: Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ONG	: Organisation Non Gouvernemental
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PAGIRE	: Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PNGIRE	: Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
RCP	: Représentative Concentration Pathway
RIBASIM	: River Basin Simulation Model
SEI	: (Stockholm Environment Institute) Institut de l'Environnement de Stockholm
SIG	: Système d'Information Géographique
SPI	: Indice Standardisé des Précipitations
UBT	: Unité de bétail Tropical
USGS	: United States Geological Survey
WEAP	: Water Evaluation And Planning System

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	ii
Sigles et abréviations.....	iii
Résumé	xi
Abstract	xii
Introduction	1
Chapitre I : Revue bibliographique sur l'eau et changement climatique	4
1. Changement climatique et Ressource en eau	4
2. Notion de modèles climatiques	5
3. Notion de la gestion Intégrée des ressources en eau	6
Chapitre II : Matériel et méthodes.....	8
1. Matériel	8
1.1. Caractérisation de la zone d'étude	8
1.1.1. Situation Géographique	8
1.1.2. Végétation	9
1.1.3. Relief et Sol	10
1.1.4. Géologie et hydrogéologie	10
1.1.5. Climat de la zone d'étude.....	11
1.1.6. Hydrographie.....	11
1.2. Données utilisées	13
1.2.1. Données hydrologiques	13
1.2.2. Données climatiques	13
1.2.3. Données socio-économiques	14
1.3. Outils de traitement de données et de modélisation	14
1.3.1. Outils SIG.....	14
1.3.2. Modèle hydrologique GeoSFM.....	14

1.3.3.	Outil Khronostat	15
1.3.4.	CropWat	15
1.3.5.	Outil WEAP	15
2.	Méthodologie	17
2.1.	Présentation des modèles GeoSFM et WEAP	17
2.1.1.	Modèle WEAP 21	17
2.1.2.	Modèle Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM)	18
2.2.	Critiques des données	19
2.2.1.	Réorganisation des données	19
2.2.2.	Comblement des données	19
2.2.3.	Contrôle des données par la méthode du double cumul	20
2.3.	Caractérisation de la variabilité climatique	20
2.3.1.	Vérification de l'homogénéité des données climatiques	20
2.3.2.	Détection des ruptures	21
2.3.3.	Calcul du déficit/Exedent	21
2.3.4.	Détermination des indices de pluies standardisées	22
2.4.	Détermination des termes du bilan hydrologique	22
2.5.	Mise en œuvre du modèle WEAP au bassin versant du Nakanbé supérieur	23
2.5.1.	Délimitation de la zone d'étude	24
2.5.2.	Réglage des paramètres généraux du modèle	25
2.5.3.	Définition des sites de captage	25
2.5.4.	Définition des sites de demande d'eau	25
2.5.5.	Priorité d'allocation	27
2.5.6.	Elaboration des scénarios	27
2.5.7.	Scénario de recours aux technologies innovantes	31
2.5.8.	Indicateur de mesure de changement entre les scénarios futurs et celui de référence	31

2.5.9.	Calage des modèles	32
2.5.10.	Validation du modèle.....	32
2.5.11.	Critères de performances	32
2.6.	Estimation des débits d'entrée dans les barrages.....	33
Chapitre III : Résultats et discussions		34
1.	Résultats de l'étude	34
1.1.	Analyse des données pluviométriques.....	34
1.2.	Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles	38
1.3.	Indices standardisés de pluies.....	39
1.4.	Termes du bilan hydrologique du bassin versant	41
1.5.	Ressources en eau disponibles dans le bassin versant.....	42
1.6.	Contribution actuelle du barrage de Goinré à l'AEP Ouahigouya	42
1.7.	Demande en eau au barrage de Ouahigouya	43
1.8.	Demande en eau des usagers du barrage de Titao	43
1.9.	Demande en eau des usagers du barrage de Tougou	44
1.10.	Demande en eau des usagers au barrage de Séguénéga.....	44
1.11.	Besoins en eau des usagers du barrage de Guitti	45
1.12.	Application du modèle WEAP au bassin supérieur du Nakanbé.....	47
1.12.1.	Calage du modèle WEAP	47
1.12.2.	Calage du modèle GEOSFM	49
1.12.3.	Niveau de satisfaction des besoins en eau actuels des usagers du barrage de Goinré	51
1.12.4.	Niveau de satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Tougou	52
1.12.5.	Niveau de satisfaction de la demande en eau au barrage de Titao	54
1.12.6.	Niveau de satisfaction de la demande en eau au barrage de Séguénéga	54
1.13.	Ressources en eau suivant les différents scénarios	55

1.13.1.	Scénario d'augmentation du nombre d'abonné au réseau de l'ONEA de Ouahigouya	55
1.13.2.	Scénarios d'exploitation du barrage de Guitti pour l'AEP.....	55
1.13.3.	Scénario d'aménagement de 450 ha en aval du barrage de Guitti.....	57
1.13.4.	Scénarios d'augmentation des périmètres irrigués au barrage de Guitti	57
1.13.5.	Prise en compte de l'effet des changements climatiques	58
1.13.6.	Recours aux techniques agricoles innovantes	59
2.	Discussions.....	60
	Conclusion et recommandations	62
	Bibliographie.....	64
	Annexe	I
	Annexe1 : Quatre grandes familles de scénarios climatiques proposées par GIEC en 2000..I	
	Annexe 2 : Caractéristiques principales des RCP	I
	Annexe 3 : Test de PETTITT	II
	Annexe 4 : Procédure de segmentation de HUBERT	Erreur ! Signet non défini.
	Annexe 5 : Test de BUIHAND	Erreur ! Signet non défini.
	Annexe 6 : Ellipse de BOIS	Erreur ! Signet non défini.
	Annexe 8 : Pluviométrie annuelle des stations pluviométriques du bassin versant	III
	Annexe 9 : Correction des données pluviométrique de la station de Gourcy par la MVR ..IV	
	Annexe 10 : Ressource en eau de surface disponible dans le bassin versant.....	V
	Annexe 11 : Comparaison entre le scénario RCP4.5 et la situation de référence	VI
	Annexe 12 : Comparaison entre le scénario RCP8.5 et la situation de référence	VI

Liste des Figures

Figure 1: Bassin versant du Nakanbé supérieur	8
Figure 2: Carte de la végétation du bassin du Nakanbé supérieur	9
Figure 3: Carte géologique du bassin versant du Nakanbé supérieur	11
Figure 4: Réseau hydrographique du bassin versant du Nakanbé supérieur	12
Figure 5: Structure du modèle WEAP pour le Bassin versant du Nakanbé supérieur	24
Figure 6: Test d'homogénéité de la station de Gourcy	35
Figure 7: Test d'homogénéités des stations de Baraboulé, Bourzanga, Kiembra et Pobé-Mengao	36
Figure 8: Test d'homogénéité après correction des données	37
Figure 9: Test d'autocorrélation	38
Figure 10: Indices standardisés de pluie sur les six stations pluviométriques du bassin versant	41
Figure 11: Demande en eau des usagers au barrage de Goinré	43
Figure 12: hydrogramme simulé et observé sans ajustement des paramètres du modèle	47
Figure 13: Hydrogramme simulé et Observé au calage (2007-2016)	48
Figure 14: hydrogramme observé et simulé à la validation (1988-1998)	49
Figure 15: hydrogramme moyen simulé et observé à la simulation	50
Figure 16: : hydrogramme simulé et observé au calage	50
Figure 17: Niveau de satisfaction des besoins en eau de Goinré en 2016	51
Figure 18: Niveau de satisfaction de la demande en eau des usagers de Goinré sur la période 2016-2050	52
Figure 19: Niveau de couverture de la demande mensuelle sur la période (2016-2050)	52
Figure 20: Couverture de la demande en eau au barrage de Tougou dans l'année de base (2016)	53
Figure 21: satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Tougou	53
Figure 22: Satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Titao	54
Figure 23: Satisfaction de la demande en eau au barrage de Séguénéga	54
Figure 24: demande en eau potable de Ouahigouya non satisfaite sous l'effet la croissance démographique	55
Figure 25: Niveau de satisfaction de la demande en eau "association Guitti et Goinré"	56
Figure 26: Couverture en de la demande à partir du Barrage de Guitti	56

Figure 27: satisfaction de la demande en eau en prenant en compte la production agricole ...	57
Figure 28: niveau de satisfaction de la demande en eau avec une augmentation de 40% des périmètres irrigués	58
Figure 29: Impact du scénario RCP8.5 sur les ressources en eau	58
Figure 30: Impact du scénario RCP4.5 sur les ressources en eau	59
Figure 31: Impact des techniques agricoles innovantes sur la disponibilité des ressources en eau	59

Liste des tables

Tableau 1: Information sur les stations météorologiques.....	13
Tableau 2: Classification de la sécheresse en fonction de l'ISP	22
Tableau 3: population concernée par le projet Guitti	26
Tableau 4: Effectif du cheptel par site en 2006 et correspondance d'un UBT par espèce.....	26
Tableau 5: Dates de rupture dans les séries pluviométriques allant de la première rupture	39
Tableau 6: Taux de variation pluviométrique	39
Tableau 7: Demande en eau en millier de m ³ au barrage de Ouahigouya	43
Tableau 8: Demande en eau au niveau du barrage de Titao en millier de m ³	44
Tableau 9: Demande en eau au barrage de Tougou e millier de m ³	44
Tableau 10: demande en eau au niveau du barrage de Séguénéga.....	45
Tableau 11: Demande en eau au barrage de Guitti en millions de m ³	47
Tableau 12: Paramètres modifiés au calage du modèle	48
Tableau 13: Valeur des paramètres physiques avant et après calage	49
Tableau 14: Critères de performances au calage.....	50
Tableau 15: paramètres physiques du bassin après calage.....	51

Résumé

D'une superficie de 4842 km² avec une pluviométrie moyenne de 600 mm, le bassin versant du Nakanbé supérieur comme l'ensemble des bassins versants du Burkina Faso a été touché par les effets des sécheresses des années 70 entraînant sa vulnérabilité. Face à pareille situation, les autorités ont mis en place un certain nombre de programmes et de projets tendant à optimiser la gestion de la ressource en eau des différents bassins versants. C'est dans ce contexte, que l'insuffisance de la production d'eau potable par les eaux souterraines a été constatée avec comme effet le recours de l'exploitation des eaux de surface à travers les retenues et les barrages pour satisfaire cette demande de plus en plus grandissante. Mais malheureusement cette nouvelle orientation connaît certaines difficultés liées en grande partie à la forte évaporation, à l'envasement et à la forte évolution démographique. La région du nord n'étant pas en reste sur les difficultés de mobilisation de la ressource en eau dans cette partie sahélienne, les autorités ont décidé de procéder dans les années 2009 à la construction du barrage de Guitti pour offrir plus de perspectives hydrauliques et hydroagricoles. En vue d'une meilleure gestion de cet ouvrage, la démarche méthodologique retenue dans le cadre de cette étude a consisté à utiliser les modèles GeoSFM pour la simulation des débits à l'entrée des barrages et WEAP comme outils d'aide à la décision pour l'évaluation et l'allocation de l'eau. Cette démarche repose sur plusieurs axes (i) procéder à la simulation des écoulements du bassin versant à partir de GeoSFM (ii) évaluer la capacité des différents ouvrages (iii) évaluer la satisfaction de la demande eau dans un contexte de changements climatiques. Nos résultats révèlent d'abord une période de rupture en 2006 au niveau de la pluviométrie caractérisée par une tendance à la hausse de la pluviométrie a été constatée. Cette modélisation à pas de temps journalier à travers GeoSFM traduit un bon comportement du modèle avec des paramètres de performance satisfaisants (critères de performance : NASH=0.79, R² =0.89, BIAIS=-0.07 et RMSE=3.99). En ce qui concerne la capacité du barrage, nos évaluations nous permettent d'obtenir un volume mobilisable de l'ordre de 71,34 millions de m³ contre 18 millions de m³ pour la demande. Malgré le caractère optimiste de l'offre par rapport à la demande (71,34 contre 18 millions de m³), la zone connaît surtout durant les mois mars-mai un déficit qui est dû en grande partie à la forte évaporation et les activités agricoles. Cette situation sera beaucoup plus critique à partir de l'horizon 2030 sur les petits ouvrages et 2040 pour Guitti.

Mots clef : *1-Modélisation ; 2-Offre ; 3-Demande ; 4-Bassin ; 5-Simulation*

Abstract

Covering an area of 4,842 km² with an average rainfall of 600 mm, the upper Nakanbé watershed, like all of Burkina Faso's watersheds, was affected by the effects of the droughts of the 1970s, leading to its vulnerability. Faced with such a situation, the authorities have set up a number of programs and projects aimed at optimizing the management of the water resources of the various watersheds. It is in this context that the insufficient production of drinking water by groundwater has been noted, with the effect of resorting to the exploitation of surface water through reservoirs and dams to satisfy this demand for water. More and more. Unfortunately, however, this new orientation is experiencing certain difficulties linked in large part to high evaporation, siltation and strong demographic change. The northern region is not to be outdone on the difficulties of mobilizing water resources in this Sahelian part, the authorities decided in 2009 to proceed to the construction of the Guitti dam to offer more hydraulic and hydroagricultural perspectives. In order to better manage this structure, the methodological approach adopted in the context of this study consisted in using the WEAP and GeoSFM models as decision support tools for the evaluation and allocation of water. This approach is based on several axes (i) simulate the watershed flows from GeoSFM (ii) assess the capacity of the various works (iii) assess the satisfaction of water demand in the context of climate change. Our results first reveal a break in 2006 in terms of rainfall characterized by an upward trend in rainfall was noted. This modeling through GeoSFM reflects a good behavior of the model with satisfactory performance parameters (performance criteria: NAHS = 0.79, R² = 0.89, BIAIS = -0.07 and RMSE = 3.99). Regarding the capacity of the dam, our assessments allow us to obtain a mobilizable volume of around 71.34 million m³ compared to 18 million m³ for demand. Despite the optimistic nature of the supply compared to the demand (71.34 against 18 million m³), the zone knows especially during the months March-May a deficit which is largely due to the strong evaporation and the agricultural activities . This situation will be much more critical from 2030 on small works and 2040 for Guitti.

Keyword : 1- Modelization ; 2- offer ; 3-Demand ; 4-Watershed ; 5-Simulation

Introduction

Le Burkina Faso est un pays sahélien d'une superficie de 274 000 Km² situé à l'intérieur de la boucle du Niger. Il est situé entre 10° et 15° de latitude Nord ; 2° de longitude Est et 5° 30' de longitude ouest. Il partage ses frontières avec six pays de la sous-région que sont le Mali au Nord et au Nord-Ouest ; la Côte d'Ivoire, le Ghana et le Togo au Sud ; le Bénin au Sud-Est et le Niger à l'Est et au Nord-Est.

A l'instar des pays de la zone sahélienne, le Burkina Faso a été touché par les effets des sécheresses des années 70 et qui ont révélé la vulnérabilité du pays face à une pluviométrie largement déficitaire et irrégulière dans le temps et dans l'espace. Cette situation a donné lieu à une prise de conscience exceptionnelle des enjeux de l'eau qui marque le tournant décisif à partir duquel tous les gouvernements successifs ont inscrit prioritairement la maîtrise de l'eau comme un axe majeur de la politique de développement du pays. Cette prise de conscience a abouti à la formulation pour la première fois en 1977 d'une politique de l'eau avec pour préoccupation centrale la satisfaction urgente des besoins en eau des populations et le renforcement des capacités d'intervention des services de l'Etat, avec en appui l'intervention des nombreuses ONG (MAHRH, 2010).

Depuis cette période, la mise en œuvre des différentes politiques, stratégies et plan d'actions en matière d'eau ont permis de réaliser plus d'un millier de barrages qui mobilisent annuellement, environ 6 milliards de mètres cubes d'eau (DGIH, 2019). Ces quantités d'eau, certes énormes, sont soumises à une forte évaporation qui entraîne un tarissement précoce des plans d'eau, rendant impraticables les activités sur la plupart des sites aux périodes critiques de l'année (mars, avril, mai). Parmi ces activités on peut retenir la production d'eau pour la consommation humaine, généralement assurée par les eaux souterraines alors que le pays est situé à 80% sur une zone de socle. De telles zones se caractérisent par des roches cristallines où le débit moyen (environ 2m³/h) des forages reste insuffisant pour satisfaire les gros besoins tels que ceux des centres urbains, les besoins industriels ou les besoins de la grande irrigation (MEE, 2001). Cette difficulté, couplée à l'accroissement de la population, oblige l'administration de l'eau à se tourner vers des projets de transfert d'eau à partir de barrages pour approvisionner certains centres urbains. L'exemple le plus illustratif est le projet d'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouagadougou à partir du barrage de Ziga (Projet Ziga) situé à environ 43 km.

Les leçons tirées du projet Ziga ont inspiré la formulation du projet d'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya à partir du barrage de Guitti. A ce jour, le barrage d'environ

44 millions de mètres cubes dont la mise en eau est intervenue en 2017 (DGIH/MEA, 2018) constitue le seul acquis du projet. Les réflexions se poursuivent encore pour la mise en place du dispositif de traitement, de stockage et de distribution de l'eau. Toutefois, l'incertitude sur l'échéance probable de réalisation des investissements complémentaires, l'accroissement de la population et les conditions climatiques défavorables font craindre un dépassement de la capacité du barrage avant même la mise en service prochaine des installations.

En effet, le bassin versant du barrage Nakanbé supérieur est situé en zone sahélienne où les précipitations annuelles restent inférieures à 750 mm. Par ailleurs, en plus de la faible pluviosité qui ne garantit pas un remplissage des barrages en toute saison, les plans d'eau sont soumis à une forte évaporation (dû notamment à la hausse de la température) à l'image de la plupart des retenues d'eau au Burkina Faso qui perdent chaque année entre 40 à 70% des quantités d'eau stockées (MEE, 2001).

Dans l'optique de prévenir les problèmes d'eau perceptibles, la connaissance des ressources en eau actuelles et futures et des besoins en eau des usagers à l'échelle du bassin versant s'avère nécessaire. Pour y parvenir, des outils adaptés sont disponibles en l'occurrence le modèle « Water Evaluation and planning System (WEAP) » qui fonctionne sur le principe du bilan d'eau et facile d'utilisation pour analyser divers scénarios de développement et de gestion de l'eau (Yates et al., 2005)

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude dont le thème s'intitule « **Modélisation de l'offre et de la demande en eau dans un contexte de changement climatique dans le bassin supérieur du Nakanbé : application du modèle WEAP à la gestion intégrée des ressources en eau** ». Elle vise à développer un outil d'aide à la décision pour orienter une gestion durable des ressources en eau du bassin supérieur du Nakanbé. Plus spécifiquement il s'agit de (i) développer un cadre conceptuel de gestion de l'eau dans le bassin supérieur du Nakanbé, (ii) utiliser WEAP pour évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les demandes en eau dans le bassin à l'horizon 2050, (iii) et proposer des options de gestion durable des ressources en eau du bassin.

Pour atteindre les objectifs fixés, il est nécessaire de formuler un certain nombre d'hypothèses : (i) au regard de la croissance démographique et du changement climatique, les ressources en eau du bassin connaîtraient une diminution sensible en termes de quantité de sorte qu'elles ne permettraient plus de couvrir les besoins des usagers à l'horizon 2050, (ii) malgré le changement climatique et la pression anthropique, le développement de nouvelles sources d'eau et/ou

l'application de technologies économes d'eau permettront de garantir la disponibilité de l'eau de façon durable aux usagers.

Le présent rapport est structuré en trois (03) chapitres dont le premier traite de la revue bibliographique sur l'eau et le changement climatique. Le second chapitre aborde le matériel et la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de l'étude tandis que le troisième présente les résultats et la discussion.

Chapitre I : Revue bibliographique sur l'eau et changement climatique

1. Changement climatique et Ressource en eau

Le climat est un phénomène global et complexe qui a un impact sur l'ensemble des formes de vie de la planète. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est « la synthèse des conditions météorologiques d'une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère » (Eldin, 1971; Remund et al., 2016).

Le changement climatique correspond à une modification durable des paramètres statistiques du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des influences extérieures ou aux activités humaines qui d'ailleurs constituent la première cause du réchauffement planétaire actuel dû à la production et au rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Bates et al., 2008). L'augmentation des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) est directement liée à la croissance industrielle et aux modes de production et de consommation qui y sont associés.

L'eau est au cœur de ces changements comme le démontrent les observations et les projections des scientifiques réunis autour du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le démontrent. Le cycle hydrologique se trouve affecté dans tous ses aspects par le changement climatique. Ces changements dans le cycle de l'eau ne sont pas sans conséquences pour les sociétés et les écosystèmes. Les ressources en eau seront menacées et affectées dans de nombreuses régions, avec des impacts sur tous les domaines du développement (accès à l'eau, sécurité alimentaire, santé, etc.), tandis que les risques de catastrophes liées à l'eau augmenteront (Meyer and PACHAURI, 2014)

Dans l'optique de limiter les effets néfastes du changement climatique et ses impacts, deux grandes catégories de politiques et de mesures existent (i) les mesures d'atténuation qui visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et (ii) les mesures d'adaptation qui visent à permettre aux populations et aux écosystèmes de faire face aux bouleversements liés au changement climatique.

Les acteurs du secteur de l'eau ont un rôle à jouer dans ces deux domaines, en limitant la consommation d'énergie du secteur (atténuation), mais surtout en intégrant la dimension climatique dans la gestion de la ressource (adaptation). La gestion du risque, de l'incertitude, l'augmentation de la résilience des populations face au changement climatique sont au cœur de l'adaptation (Coalition eau, 2014).

2. Notion de modèles climatiques

Ils proviennent des simulations issues des différents modèles du climat qui sont des représentations numérique du système climatique basés sur les équations qui régissent les processus physiques des composantes du climat (Murphy et al., 2004). Ils sont utilisés par les usagers des projets en impacts et adaptations pour analyser les impacts potentiels des changements climatiques. La plupart des projections du climat futur proviennent des Modèles Climatiques Globaux (MCG) avec une résolution Spatiale d'environ 200 à 300 km.

A l'issue du 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC publié en 2007, un ensemble de scénarios ont été publiés en vue de simuler l'évolution possible de nos sociétés et modes de vie tout en prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation. Ces scénarios, appelés SRES (Special Report on Emissions Scenarios) proposaient plusieurs évolutions du climat à travers quatre grandes familles de scénarios (A1, A2, B1, B2) (annexe1) et se traduisent en termes d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES). Ces évolutions d'émissions des GES étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles de projections climatiques (Mondon and Imbard, 2013).

Compte tenu de l'évolution rapide des déterminants socio-économiques tels que l'économie, les technologies, les politiques publiques et la connaissance du système climatique, les SRES semblaient ne plus répondre aux réalités. En effet, les projections démographiques globales ont été revues à la baisse, de 14 milliards d'humains à 10 milliards à l'horizon 2100 (Guivarch and Rozenberg, 2013; Léger, 2016).

De plus, à l'échelle mondiale, il a été imposé la réduction des émissions de gaz et les rétroactions en termes d'impacts et d'adaptation qui jadis n'étaient pas inclus dans les scénarios précédents (Martin, 2010) . De là est né la nécessité de la révision des scénarios pour prendre ces aspects en compte et envisager d'avoir des évolutions des émissions globales des GES qui diminueraient après une phase de croissance au XXI^e siècle et qui obligent certains scénarios à être prolongés au-delà de 2100. Le GIEC a donc décidé de définir des nouveaux scénarios pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte afin de permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle. Mais contrairement aux SRES, ces nouveaux scénarios ne sont pas définis par le GIEC. Ils ont plutôt été établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC en quatre trajectoires d'émission et de concentration des GES, d'ozone et d'aérosols ainsi que d'occupation des sols baptisés « Representative Concentration Pathways (RCP) » (Ebi et al., 2014; Moss et al., 2010).

3. Notion de la gestion Intégrée des ressources en eau

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (Niasse, 2000). La GIRE est donc l'application des principes du développement durable au secteur de l'eau. La GIRE est également un concept empirique développé à partir de l'expérience des professionnels de l'eau sur le terrain. Elle est aussi une approche souple de la gestion de l'eau qui peut s'adapter aux différents contextes internationaux, et locaux. Elle vise à intégrer les multiples parties prenantes, usages et enjeux concurrents, dont la préservation environnementale, afin d'assurer la pérennité des ressources en eau.

Son objectif est d'atteindre un équilibre entre utilisation de l'eau en tant que fondement pour la subsistance d'une population mondiale en plein essor, sa protection et sa conservation en vue de garantir la pérennité de ses fonctions et caractéristiques.

La GIRE est un concept empirique développé à partir de l'expérience des professionnels de l'eau sur le terrain. Elle est aussi une approche souple de la gestion de l'eau qui peut s'adapter aux différents contextes internationaux et locaux. La gestion intégrée des ressources en eau permet d'aider les pays à faire face aux problèmes liés à l'eau de manière économiquement efficace et durable. L'intérêt du concept de gestion intégrée des ressources en eau s'est développé au lendemain des conférences internationales sur l'eau et l'environnement qui se sont tenues à Dublin et Rio de Janeiro en 1992.

Depuis le milieu des années 1990, le Burkina Faso s'est engagé dans la formulation et la mise en œuvre d'un Plan d'Action de gestion intégrée des ressources en eau adapté au contexte national. Depuis lors de nombreuses étapes majeures ont été franchies : (i) la préparation d'un état des lieux de ressources en eau et de leur cadre de gestion, (ii) la formulation et l'adoption de la loi n°002-AN/2001 portant loi d'orientation relative à la gestion de l'eau et de nombreux textes d'application, (iii) la formulation et la mise en œuvre d'un Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE), (iv) la création du Conseil National de l'Eau, du Comité Technique de l'Eau, du Secrétariat Permanent du PAGIRE, des Agences de l'Eau, de Comités Locaux de l'Eau, (v) la conception et la mise en application de la contribution financière en matière d'eau (MEA, 2006)

Le processus de mise en œuvre de la GIRE n'est cependant pas achevé et des actions restent à mener pour continuer cette réforme et consolider la GIRE. Ainsi, pour la période 2016-2030, le Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PNGIRE) vise à contribuer durablement à la satisfaction des besoins en eau douce des usagers et des écosystèmes aquatiques.

L'atteinte de cet objectif passe nécessairement par la connaissance des ressources en eau, la maîtrise des aspects transversaux sur le changement climatique. Cette connaissance sera également rendue possible grâce au renforcement des capacités des acteurs sur la maîtrise d'outils d'aide à la décision. Parmi les outils de modélisation de l'offre et de la demande des ressources en eau on peut citer : (i) Integrated Water Resources Management and Planning MIKE BASIN ; (ii) River Basin Simulation Model (RIBASIM), (iii) Modeling System for River Basin Allocation (AQUARIUS); (iv) Water Evaluation And Planning (WEAP);

Notre choix s'est porté sur WEAP à cause de son utilisation facile et de son accès presque gratuit pour les chercheurs et les pays en voie de développement.

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Matériel

1.1. Caractérisation de la zone d'étude

1.1.1. Situation Géographique

Le bassin versant du Nakanbé supérieur est situé dans la partie sahélienne du bassin versant du Nakanbé. Il est compris entre les 1^{er} degrés 45 minutes et 2^{ème} degrés 35 minutes 45 secondes de longitude Ouest et les 13^{ème} degrés 20 minutes et 14^{ème} degré 5 minutes de latitude Nord. Son exutoire (02° 02' 5''O et 13° 21' 40''N) se situe sur le cours d'eau principal du Bassin versant du Nakanbé dans le village Guitti (Figure 1).

Le bassin Supérieur du Nakanbé s'étend partiellement sur trois provinces de la région du nord (Zondoma, Yatenga et Loroum), une province de la région du Centre Nord (Le Bam) et une province de la région du sahel (Le Soum).

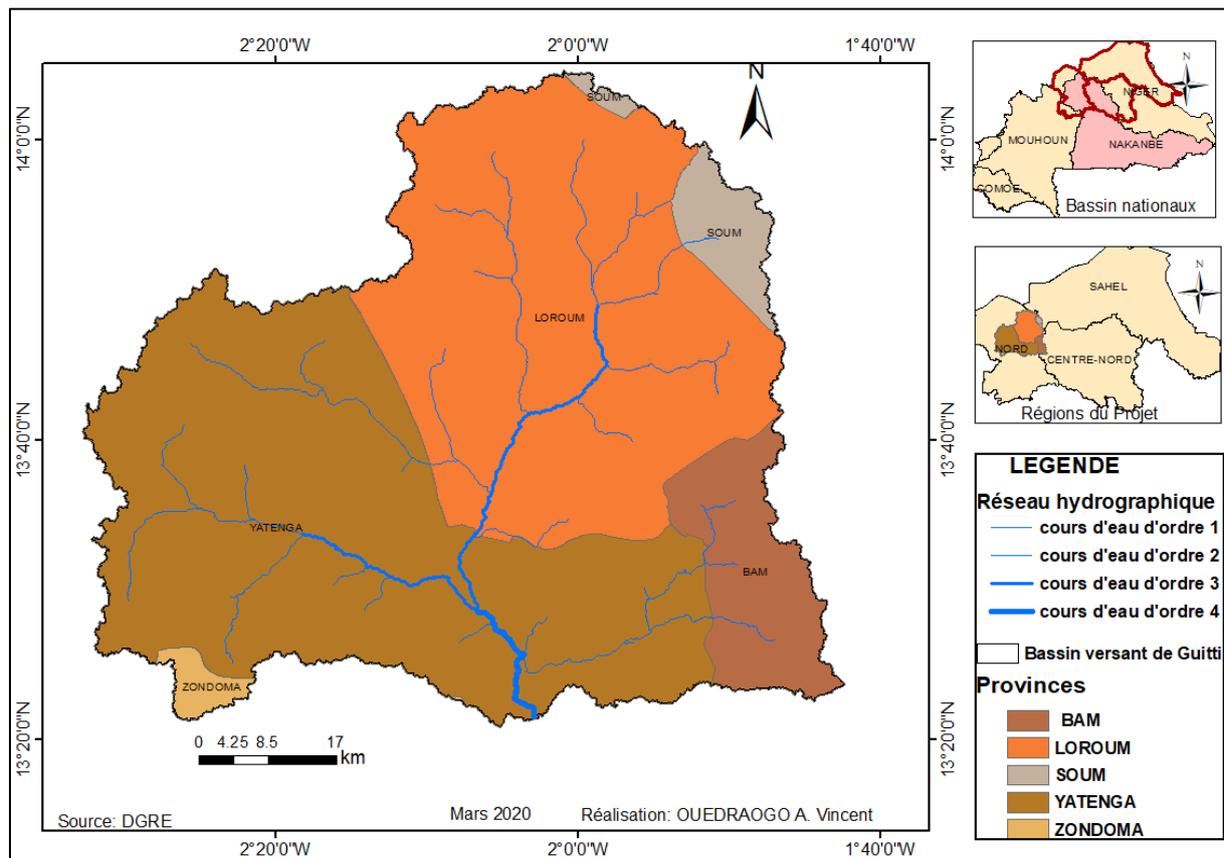


Figure 1: Bassin versant du Nakanbé supérieur

1.1.2. Végétation

Le bassin Supérieur du Nakanbé est une zone de savane à tendance sahélienne. Cette zone présente quatre formations végétales (Figure 2) :

- Une forêt galerie qui correspond aux formations végétales bordant les différents cours d'eau. Les conditions hydrologiques et pédologiques le long des cours d'eau, favorisent la croissance des arbres. A ces endroits on rencontre des formations végétales denses et riches composées de grands arbres ;
- Une savane arborée fortement marquée par l'action anthropique. Partout le paysage arboré ne révèle plus que des témoins de boisements denses anciens. Les espèces les plus fréquentes sont *Balanites aegyptiaca*.
- une savane arbustive qui se localise sur les interfluves, les glacis et une partie de la pénéplaine. Elle est composée d'une strate ligneuse dont la hauteur varie entre 3 et 5 mètres.
- Une savane herbeuse qui s'étend sur les collines, les tables cuirassées et les revers de pseudo-cuesta. Cette formation se caractérise par une très importante strate herbacée étagée. On rencontre le plus souvent des formations ligneuses de très basse taille dont la hauteur varie de 1,5 à 3 mètres (SORO, 1993).

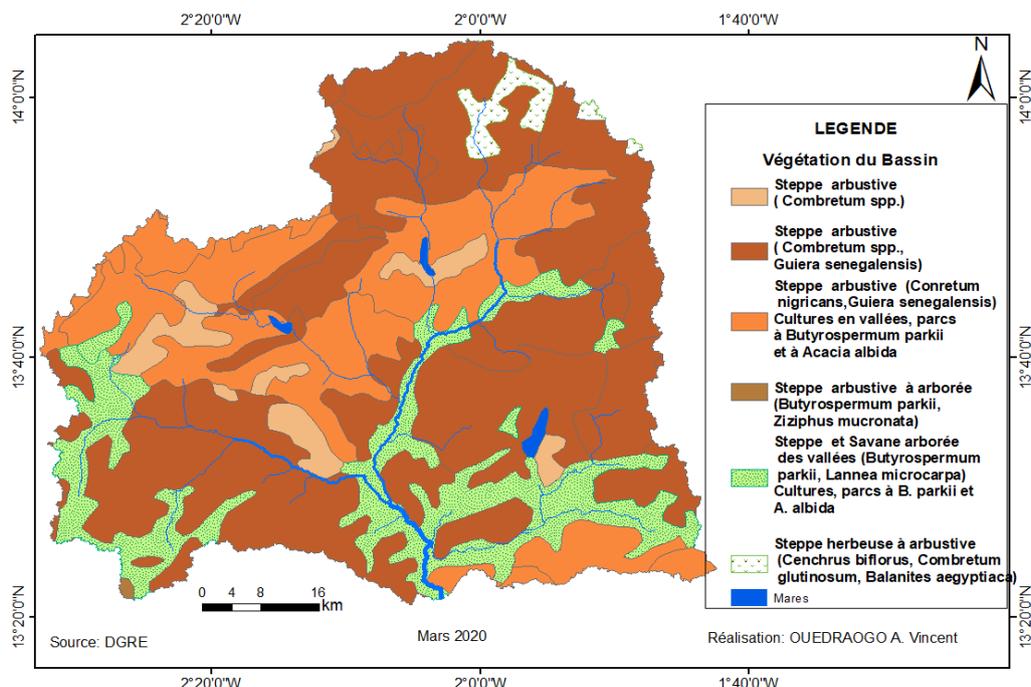


Figure 2: Carte de la végétation du bassin du Nakanbé supérieur

1.1.3. Relief et Sol

Le relief a une influence directe sur les paramètres hydrométéorologiques du bassin versant. En effet de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude. Selon la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), le relief du bassin Supérieur du Nakanbé est relativement faible avec une densité spécifique de 17,46 m. Le bassin renferme plusieurs types de sols : (i) les sols des bas-fonds à prédominance argileux et correspondent aux sols hydromorphes, (ii) les sols gravillonnaires de type ferrugineux tropicaux et prédominant sur tout le bassin versant, (iii) les affleurements cuirassés correspondant aux sols minéraux bruts et (iv) les sols ferrugineux tropicaux qui sont peu répandus sur le bassin versant(MAHRH, 2005).

Les sols du bassin Supérieur du Nakanbé appartiennent aux classes I (Sols minéraux brut), II (Sols peu évolués) et III (Sols à sesquioxydes de fer) caractérisés par leur faible potentialité agricole et sujet à l'érosion(Marchal, 1983).

1.1.4. Géologie et hydrogéologie

A l'instar du Burkina Faso, la majeure partie du bassin Supérieur du Nakanbé est constitué par des formations birrimiennes (Précambrien C) et antébirrimiennes (Précambrien D). Le précambrien D forme l'ossature de la majeure partie du bassin versant sous forme de vastes noyaux à prédominance granito-migmatitique (HOTTIN and OUEDRAOGO, 1975; OUEDRAOGO, 1994)

Le bassin est entièrement situé dans la zone de socle et on y distingue trois systèmes d'aquifères généralement superposés : les aquifère de la zone altérée, les aquifères du milieu fissuré et les aquifères des latérites. Les aquifères captés par les forages correspondent généralement aux zones de fractures ou de fissures dans la roche altérée. Les niveaux statiques sont situés à une profondeur généralement inférieure à 30 mètres. Les épaisseurs d'altération sont relativement fortes, de 35 à 50 mètres voire supérieures à 75 mètres principalement dans les provinces du Yatenga et du Loroum(Koussoubé, 1996).

La profondeur des forages est proportionnelle aux épaisseurs d'altérations et est en moyenne de 80 mètres avec des débits très variables(MAHRH, 2010). La Figure 3 présente la géologie du bassin versant du barrage de Guitti.

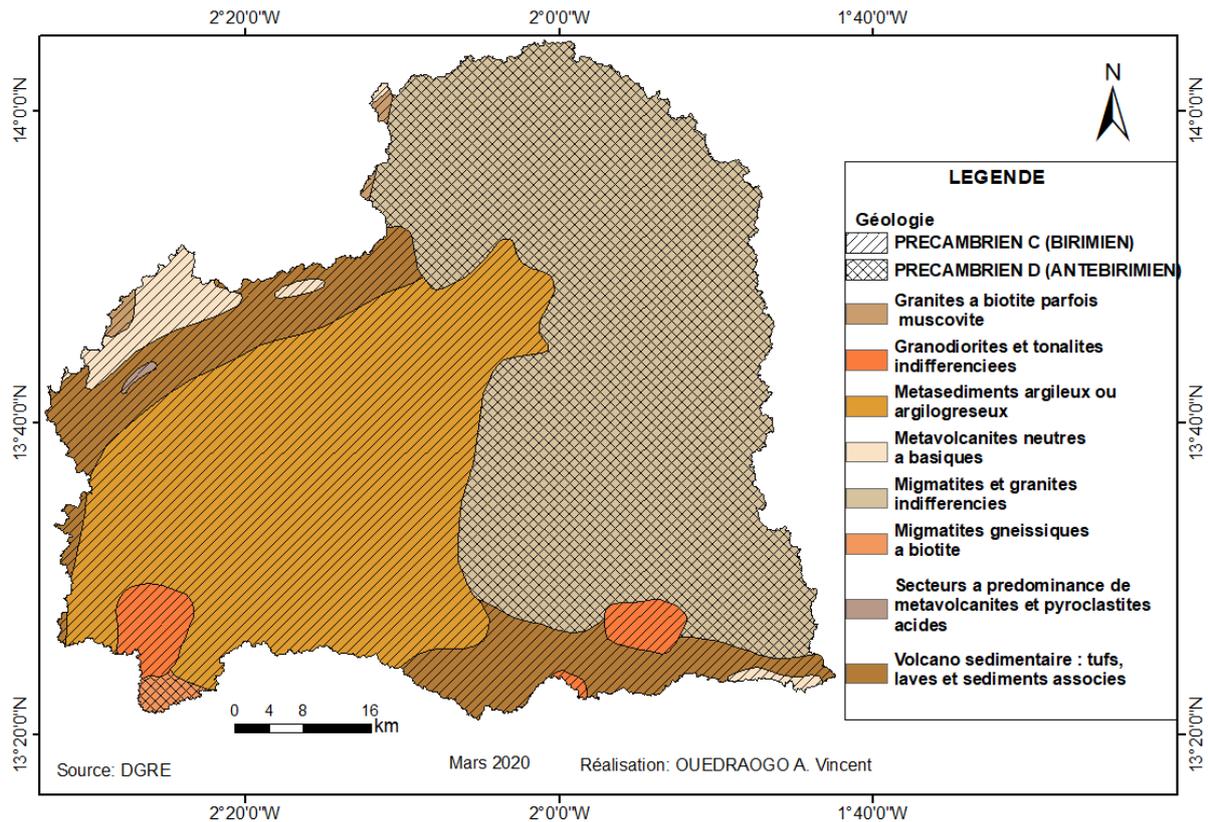


Figure 3: Carte géologique du bassin versant du Nakanbé supérieur

1.1.5. Climat de la zone d'étude

Le bassin Supérieur du Nakanbé est situé dans la zone sahélienne au nord de l'isohyète 600 mm avec un climat caractérisé par une alternance d'une saison sèche (octobre à mai) et une saison pluvieuse très irrégulière (juin à septembre).

L'évaporation au bac class A moyenne annuelle obtenue à partir de la station synoptique de Ouahigouya est d'environ 3300 mm.

Les principaux vents de la zone à l'instar du Burkina Faso sont l'harmattan, un vent sec qui souffle de novembre à mars et la mousson, un vent chaud et humide qui souffle de mai à octobre.

Le régime des vents, leur orientation et leur intensité fort complexes, varient avec les saisons.

1.1.6. Hydrographie

Le bassin Supérieur du Nakanbé est situé dans la zone sahélienne du Burkina Faso où la pluviométrie moyenne est comprise entre 400 à 600 mm. Le réseau hydrographique est moins dense et les écoulements sont temporaires et tributaires de la pluviométrie de la zone. A la

faveur du programme national de lutte contre l'insécurité alimentaire, une trentaine de petits barrages ont été réalisés sur les affluents du Nakanbé parmi lesquels les barrages d'Andékanda, de Tougou et de Titao dans le Loroum ; les barrages de Goinré et de Guitti dans le Yatenga. Aussi, faut-il souligner, à l'exception de quelques grands barrages, le caractère temporaire des retenues d'eau du bassin. La plupart des réserves de surface (mares et petites retenues) tarissent quelques temps après la saison des pluies (MAHRH, 2010).

Sur le plan hydrologique, neuf stations hydrométriques dont trois à débit (Rambo, Dombé et Ramsa) installées sur le Nakanbé permettent de suivre les écoulements et six stations à volume (Guitti, Tougou, Titao, Goinré, Ouahigouya et Séguénéga) pour le suivi du niveau de remplissage des retenues d'eau dans le bassin. Mais à la faveur de la réalisation du barrage de Guitti en 2017, la station de Ramsa a été supprimée car elle se situe désormais à l'intérieur du plan d'eau (Figure 4).

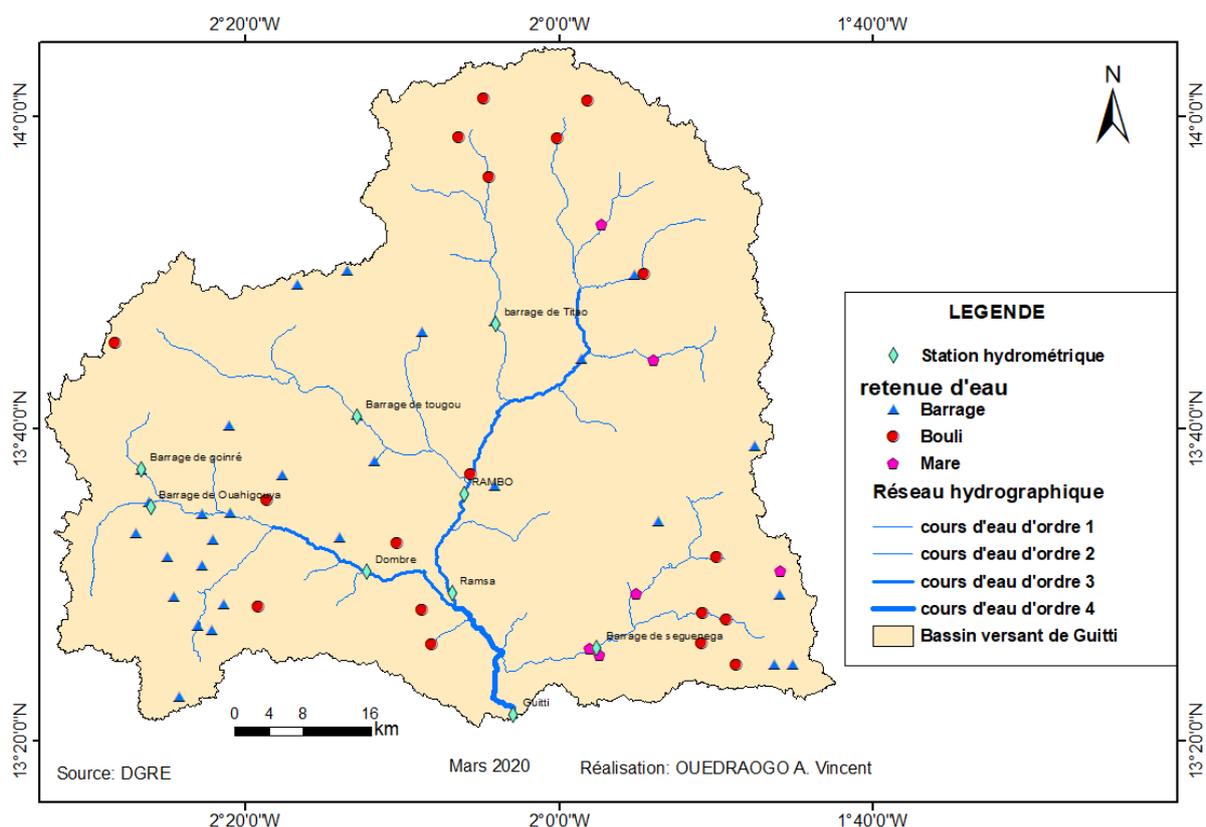


Figure 4: Réseau hydrographique du bassin versant du Nakanbé supérieur

1.2. Données utilisées

1.2.1. Données hydrologiques

L'étude concerne les ouvrages de mobilisation des ressources en eau de surface du bassin versant du Nakanbé situés en amont du barrage de Guitti. Cette portion du bassin versant du Nakanbé compte neuf stations hydrométriques installées sur des sections de retenues et cours d'eau.

Au niveau de ces stations, ont été recueillies des séries chronologiques de débits journaliers du Nakanbé à la station de Rambo sur la période 1982 à 2019 et les niveaux de remplissage journalier des barrages (Guitti, Séguénéga, Tougou, Titao, Ouahigouya et Goinré) sur la période 1990 à 2019. Ces données ont été fournies par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso.

Aussi, des données mensuelles sur les prélèvements d'eau souterraine couvrant la période 2000-2019 ont été collectées auprès de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA). Ces données concernent une trentaine de forages servant à l'alimentation en eau potable des villes de Ouahigouya, Séguénéga et de Titao sur la période 2000 à 2019.

1.2.2. Données climatiques

Les données climatiques constituent l'une des données d'entrée du modèle WEAP. Elles ont été fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) du Burkina Faso. Il s'agit d'une part de la pluviométrie journalière observée sur la période 1980-2018 aux stations de Ouahigouya, Bourzanga, Gourcy, Kiembara, Pobé-Mengao et Baraboulé et d'autre part de la température, de l'évapotranspiration journalière, de l'humidité relative, de la vitesse du vent observés sur la période 1980-2018 à la station synoptique de Ouahigouya (Tableau 1).

Tableau 1: Information sur les stations météorologiques

Nom de la station	Coordonnées géographiques		Chroniques	Taille de l'échantillon	Lacunes
	Longitude	Latitude			
Baraboulé	-1.85	14.2167	1980-2017	39	2
Bourzanga	-1.55	13.6833	1980-2019	39	0
Gourcy	-2.35	13.2	1980-2018	39	7
Kiembara	-2.7167	13.25	1980-2019	39	2
Ouahigouya	-2.4333	13.5833	1961-2019	39	0
Pobé-Mengao	-1.7667	13.9	1980-2019	39	3

1.2.3. Données socio-économiques

Les données sur les usages et usagers de l'eau ont été collectées auprès de différentes structures et à partir de la revue documentaire. En effet, les données sur la population rurale et urbaine du bassin ont été reconstituées sur la base des statistiques de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD). La population des villages à desservir dans le cadre du projet d'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) de Ouahigouya à partir du barrage de Guitti a été fournie par les services de l'ONEA. Quant aux données sur le cheptel de la zone d'étude, elles proviennent de la Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques du Nord (DRRAH-N). Les données sur l'agriculture (superficies aménagées et potentiel aménageable, spéculations, nature des sols, cycle des cultures, date et début des campagnes de culture, etc.) ont été collectées auprès de la Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydroagricole du Nord (DRAAHA-N). Enfin, les données topographiques sur le bassin versant ont été obtenues à partir des images satellites (SRTM) de la zone, téléchargées sur le site de la NASA (www.usgs.gov).

1.3. Outils de traitement de données et de modélisation

Le traitement des données ci-dessus citées s'est appuyé sur plusieurs outils de traitement, de modélisation et du Système d'Information Géographique (SIG).

1.3.1. Outils SIG

Deux outils SIG ont été utilisés à savoir les logiciels ArcGIS et ArcView. L'outil ArcGIS a été utilisé pour caractériser le bassin versant, calculer ses paramètres et élaborer les différentes cartes en s'appuyant sur les modèles numériques de terrain de la zone d'étude. Quant à l'outil ArcView, il a été utilisé comme environnement de travail pour le logiciel GeoSFM.

1.3.2. Modèle hydrologique GeoSFM

Le modèle Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM) a été mis au point en novembre 2003, par l'institut d'études géologiques des États-Unis « United States Geological Survey » (USGS), dans le cadre du système FEWS (Famine Early Warning Systems Network). C'est un modèle semi-distribué qui tente de reproduire le phénomène naturel de l'écoulement sur les bassins versants. GeoSFM intègre toutes les variables déterminantes (pente du bassin versant, occupation des sols, humidité initiale du sol, les pertes par infiltration...) pour la génération des débits.

Le modèle GeoSFM fait partie de la famille des modèles semi-distribués qui sont considérés comme un compromis entre les modèles distribués et globaux. Les modèles semi-distribués sont caractérisés par la subdivision du bassin versant en sous bassins. L'étude se fait par sous bassins, en considérant les paramètres physiques de chaque sous bassin étudié.

Le fonctionnement du modèle s'effectue suivant trois étapes : la détermination des paramètres physiques de chaque sous bassin, l'évaluation du bilan d'eau pour chaque sous bassin et le routage (cheminement) des eaux entre les différents sous bassins jusqu'à l'exutoire (Asante et al., 2008).

1.3.3. Outil Khronostat

Khronostat est un outil statistique qui a été développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Il a été utilisé pour détecter des ruptures dans les séries chronologiques des données hydrologiques et climatiques par application des tests statistiques (homogénéités et de ruptures) permettant de faire ressortir l'historique du climat et les changements passés.

1.3.4. CropWat

L'évaluation des besoins en eau actuels des cultures a été faite à partir de l'outil CropWat qui est un outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion de l'irrigation. Il a été développé par la division Land and Water Développement (LWD) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture « Food and Agriculture Organization of the United Nations » (FAO). Il permet les calculs standards d'évapotranspiration de référence, des besoins en eau des plantes et plus spécifiquement, pour la gestion des schémas d'irrigation. Le logiciel intègre des données sur les coefficients culturaux, le nombre de jours des différents stades végétatifs, les profondeurs racinaires et des outils assez simples pour l'estimation des besoins en eau qui serviront de données d'entrée de WEAP.

1.3.5. Outil WEAP

Le modèle « Water Evaluation And Planning System (WEAP) » est outil de planification et de gestion de l'eau développé par l'Institut de l'Environnement de Stockholm (SEI). Il a été l'outil de base pour la modélisation du devenir des ressources en eau et la demande en eau en prenant en compte le changement climatique et la pression humaine. Il utilise les données hydroclimatiques pour prévoir les variations des ressources en eau en termes de quantité, de

qualité et de besoins pour les différents usages. Il permet également l'élaboration et l'analyse des scénarii (changement climatique, forte démographie, accroissement des superficies cultivées, etc.) pour aider à la prise de décision sur la formulation et la mise en œuvre de mécanismes plus efficaces de fourniture de l'eau à tous les usagers. WEAP est téléchargeable à l'adresse www.weap21.org.

2. Méthodologie

2.1. Présentation des modèles GeoSFM et WEAP

2.1.1. Modèle WEAP 21

De nombreuses régions sont confrontées à des défis majeurs de gestion de l'eau. L'allocation de ressources en eau limitées, la qualité de l'environnement et les politiques d'utilisation durable de l'eau sont des sujets de préoccupation croissante. Les modèles de simulation classiques orientés vers l'offre ne sont pas toujours adéquats.

C'est ainsi qu'on a assisté à l'émergence d'une approche intégrée du développement de l'eau et qui place les projets d'approvisionnement en eau dans le contexte des problèmes liés à la demande, à la qualité de l'eau, à la préservation et la protection des écosystèmes. WEAP intègre ces valeurs dans un outil pratique de planification des ressources en eau.

Cet outil a été développé en 1988 par l'Institut de l'Environnement de Stockholm. Il se veut être un outil de planification flexible, intégré et transparent pour l'évaluation de la durabilité de la demande et de la distribution actuelles et pour explorer les scénarios alternatifs à long terme.

WEAP a été appliqué pour la première fois en Asie centrale dans le lac d'Aral en 1989 par l'Institut de l'Environnement de Stockholm (SEI). Au fil des années, il a été appliqué dans de nombreux pays et bassins fluviaux.

WEAP se distingue par son approche intégrée de la simulation des systèmes d'eau et par son orientation politique. WEAP place la demande en eau (les modes d'utilisation de l'eau, l'efficacité des équipements, la réutilisation, les coûts et l'allocation) sur un même pied d'égalité que l'offre (le débit, les eaux souterraines, les réservoirs et les transferts d'eau) (Yates et al., 2005)

WEAP est complet, simple et facile à utiliser, et tente d'aider plutôt que de se substituer au planificateur compétent. En tant que base de données, WEAP fournit un système pour maintenir les informations sur la demande et l'approvisionnement en eau. En tant qu'outil de prévision, WEAP simule la demande en eau, l'approvisionnement, le ruissellement, les débits, le stockage, la génération de pollution, le traitement et le rejet et la qualité de l'eau des cours d'eau. En tant qu'outil d'analyse des politiques, WEAP évalue une gamme complète d'options de

développement et de gestion de l'eau et prend en compte les utilisations multiples et concurrentes des systèmes d'eau (Yates et al., 2013).

2.1.2. Modèle Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM)

Un modèle hydrologique est une représentation simplifiée de l'état d'un système hydrologique (bassin versant) et de son évolution sous l'influence de certaines variables (pluviométrie, évapotranspiration, nature du sol, couverture du sol). Un modèle hydrologique comprend généralement deux parties : la fonction de production et la fonction de transfert.

La fonction de production concerne la transformation de la pluie tombée sur le bassin en eau disponible pour le ruissellement. Une partie de l'eau des pluies est infiltrée dans le sol et alimente les nappes. Une autre portion de l'eau est prélevée par la végétation du bassin et s'évapore par la suite et dépend essentiellement de la température du milieu et de la couverture végétale de la zone. Une partie enfin de l'eau de pluie ruisselle pour alimenter les cours d'eau. Le ruissellement est fonction de la pente du bassin, de la couverture végétale et de la nature du sol (Fritsch and Servat, 1998; Velluet, 2014; Vissin, 2007).

La fonction de transfert a pour but de représenter simplement les différentes voies que peut suivre l'eau entre le moment où elle atteint le sol et celui où elle rejoint les voies d'écoulements (rivières). Cette fonction permet ainsi de reproduire le cheminement de l'eau dans les rivières.

GeoSFM a été mis au point en novembre 2003, par USGS, dans le cadre du système FEWS. C'est un modèle semi-distribué qui tente de reproduire le phénomène naturel de l'écoulement sur les bassins versants. GeoSFM intègre toutes les variables déterminantes pour la génération des débits.

Le fonctionnement du modèle s'effectue suivant trois étapes : la détermination des paramètres physiques de chaque sous bassin, l'évaluation du bilan d'eau pour chaque sous bassin et le routage (cheminement) des eaux entre les différents sous bassins jusqu'à l'exutoire (AFOUDA et al., 2015; Asante et al., 2008; RIVER, 2006)

2.2. Critiques des données

2.2.1. Réorganisation des données

Les données hydroclimatiques ont d'abord été soumises à un prétraitement qui a consisté à la réorganisation des données d'entrée dans les modèles hydrologiques utilisés et les logiciels statistiques. Elles ont été soumises par la suite à un contrôle de qualité et d'une reconstitution des données manquantes.

La taille des données sur toutes les stations est assez longue (1980-2018) et satisfaisante pour une analyse statistique

2.2.2. Comblement des données

Le comblement des données manquantes a été faite à l'aide de la Méthode du Vecteur Régional (MVR). C'est un modèle simple de représentation des informations pluviométriques d'une station par une séquence d'indices annuels, représentatifs des précipitations dans la région et par des coefficients caractéristiques de chaque poste d'observation (Hiez, 1986, 1977). Pour chaque station pluviométrique, un indice (rapport de la pluie annuelle sur la pluie interannuelle) a été calculé. Lorsque cet indice est supérieur à un (01) l'année est excédentaire. Dans le cas contraire elle est dite déficitaire. La moyenne des indices obtenus pour l'ensemble des stations constitue la valeur représentative de la zone d'étude considérée (Bi and Armand, 2013). La série des indices annuels représentatifs est appelée vecteur régional, car elle prend en compte l'information d'une région supposée climatiquement homogène (Mahé and L'Hôte, 1995).

L'application de la MVR se fait soit à l'aide de la méthode de G. HIEZ (1977) basée sur le mode (valeur la plus fréquente) ou soit à l'aide de la méthode de Y. BRUNET-MORET (1979) basée sur la moyenne. Elles permettent d'éliminer les valeurs trop particulières afin d'éviter la contaminations des estimations par des données erronées (Bi and Armand, 2013). Dans le cadre de notre étude, la méthode de BRUNET-MORET a été retenue en considérant que la moyenne est le meilleur estimateur (Bi and Armand, 2013).

Cette méthode est implémentée dans le logiciel Hydraccess et permet de combler les lacunes par des données calculées. La validation des résultats de comblement des données a été effectuée par une régression linéaire entre les données observées et celles calculées. Les séries

de données complétées sur la période 1980-2018 pour l'ensemble des stations, ont ensuite servi au calcul des indices de pluie standardisés et pour l'application des tests de rupture.

2.2.3. Contrôle des données par la méthode du double cumul

La méthode de double cumul permet de vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations. L'une des stations est considérée comme station de référence, supposée correcte et l'autre, celle à contrôler. La station de Ouahigouya a été choisie comme station de référence compte tenue de la continuité des données observées depuis sa création en 1905.

Le principe de la méthode des doubles cumuls consiste à tracer progressivement le cumul d'un paramètre du poste à tester en fonction de celui du même paramètre de la série de référence. Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité (Hiez, 1977; Lamarque and Jourdain, 1994).

Elle permet de détecter l'erreur et d'envisager une correction en appliquant le facteur de correction suivant :

$$P_{\text{cor}} = \frac{m}{m'} * P_{\text{ref}} \quad (1)$$

Où P_{cor} est la pluie corrigé, P_{ref} la pluie de la station de référence, m la pente de la portion du graphe jugé fiable et m' , la pente de la portion à corriger.

2.3. Caractérisation de la variabilité climatique

2.3.1. Vérification de l'homogénéité des données climatiques

L'homogénéité des données a été vérifiée à partir du test de corrélation sur le rang. Le test de corrélation sur le rang (Lubes-Niel et al., 1998) a été appliqué à l'aide du logiciel Khronostat. C'est un test non paramétrique qui teste l'homogénéité d'une série temporelle avec pour hypothèse alternative, celle d'une tendance. La mise en œuvre de ce test repose sur un comptage du nombre de paires P pour lesquelles $(x_j > x_i)$ avec $j > i$ pour $i = 1, \dots, n - 1$. La variable du test τ se formule comme suit :

$$\tau = \frac{4P}{N(N - 1)} - 1 \quad (2)$$

Sous une hypothèse nulle avec un grand nombre d'observations N , la variable τ suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance défini par :

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{2(N + 5)}{9N(N - 1)} \quad (3)$$

2.3.2. Détection des ruptures

Les pluies moyennes annuelles des différentes stations du bassin Supérieur du Nakanbé ont été analysées à l'aide du logiciel Khronostat en vue de détecter une éventuelle rupture liée à une non-stationnarité. D'une manière générale, une rupture se définit comme étant le changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu (Ardoin-Bardin, 2004).

Khronostat comporte différents tests statistiques : test non paramétrique de PETTITT (annexe 3) (Pettitt, 1979), le test de BUIHAND (annexe5), l'ellipse de BOIS (annexe 6), la méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN et méthode de segmentation de HUBERT (annexe 4). Pour ces tests, l'hypothèse nulle H_0 correspond à l'absence de rupture au seuil de 1 %. Ces tests sont sensibles à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, ils proposent une estimation de la date de rupture. Dans cette étude, le test de PETTITT a été utilisé. En effet ce test est réputé pour sa robustesse et sa puissance. Aussi, a-t-il fait l'objet de plusieurs applications dans différentes régions (BRUNEAU and CLAUDE, 1983; Lubes-Niel et al., 1998; Soro et al., 2011).

2.3.3. Calcul du déficit/Excédent

Dans le cas où on observe une rupture sur les séries historiques, il est souhaitable de calculer la variation de la série correspondante entre la période d'avant rupture et celle d'après. Cette variation qui traduit une tendance à la baisse (déficit) ou à la hausse (excédent) se caractérise par :

$$T = \frac{M_{ap} - M_{av}}{M_{av}} * 100 \quad (4)$$

M_{ap} et M_{av} désignent respectivement la moyenne de la série chronologique avant et après rupture. Si l'excédent T est positif, on a une tendance à la hausse et une tendance à la baisse dans le cas contraire.

2.3.4. Détermination des indices de pluies standardisées

L'Indice Standardisé des Précipitations (ISP) créé en 1993 (McKee et al., 1993) est donnée par :

$$ISP = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (5)$$

Avec P_i est le cumul de la pluie annuelle pour une année i , \bar{P} et σ sont respectivement la moyenne interannuelle et l'écart type de la série chronologique des précipitations annuelles à une station donnée.

Cet indice caractérise la sévérité de la sécheresse dans une zone donnée (Tableau 2) (Ali and Lebel, 2009; Ardoin-Bardin, 2004; BERGAOUI and Alouini, 2002).

Tableau 2: Classification de la sécheresse en fonction de l'ISP

Classe de ISP	Degré de la sécheresse
ISP > 2	Humidité extrême
1 < ISP < 2	Humidité forte
0 < ISP < 1	Humidité modéré
0 > ISP > -1	Sécheresse Modéré
-1 > ISP > -2	Sécheresse forte
ISP > -2	Sécheresse extrême

2.4. Détermination des termes du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant vise à établir le lien entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donnée. Le bilan hydrologique s'établit en prenant comme facteurs les précipitations (P), le ruissellement (R), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'infiltration (I) et se définit par :

$$P = R + ETR + I \quad (6)$$

Les précipitations sont données au niveau des stations pluviométriques. La pluie moyenne sur le bassin versant niveau du bassin d'étude a été obtenue par la méthode de Thiessen. Elle consiste d'abord à déterminer la zone d'influence (superficie) de chaque pluviomètre et à le rapporter à la superficie totale du bassin versant (annexe 7). La pluie moyenne sur le bassin versant est ensuite donnée par la relation :

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i * P_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (7)$$

Avec \bar{P} (mm) la pluie moyenne du bassin en mm, S_i (km²) la superficie partielle correspondant à la superficie de la zone d'influence du pluviomètre i et P_i (mm) la pluie moyenne annuelle du pluviomètre i .

Le ruissellement R (mm) a été calculé à partir du débit moyenne annuel donné au niveau de la station hydrométrique de Rambo par :

$$R \text{ (mm)} = \frac{V \text{ (m}^3\text{)}}{S \text{ (m}^2\text{)}} * 1000 \quad (8)$$

Où V est le volume moyen écoulé dans le bassin versant et (S) la superficie du bassin versant.

L'évapotranspiration réelle a été déterminée à partir des formules empiriques dont celle de Coutagne et de Turc (équation 11). Ces formules permettent de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) moyenne annuelle ou le déficit en fonction des précipitations et de la température.

La formule de Coutagne est donnée par l'équation 10.

$$D \text{ (m)} = P - \alpha P^2 \quad (9)$$

avec $\alpha = \frac{1}{0.8+0.14T}$, si $\begin{cases} \frac{1}{8\alpha} < P < \frac{1}{2\alpha}, \text{ la fonction n'est pas applicable} \\ P < \frac{1}{8\alpha}, D = P \text{ et dans ce cas pas d'écoulement} \\ P > \frac{1}{2\alpha}, D \text{ est independant de } P, D = \frac{1}{4\alpha} \end{cases}$

Le déficit dans la formule de Turc est donné par :

$$D \text{ (mm)} = \frac{P - \alpha P^2}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \text{ avec } L = 300 + 25T + 0.05T^3, P \text{ (mm) et } T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (10)$$

2.5. Mise en œuvre du modèle WEAP au bassin versant du Nakanbé supérieur

Le choix du logiciel WEAP utilisé dans le cadre de notre travail se justifie par sa disponibilité, son accessibilité et la disponibilité des paramètres d'entrées. Le modèle WEAP est basé sur la construction et l'évaluation de scénarios d'évolutions de systèmes des ressources en eau. Il propose une intégration continue entre modèles hydrologiques semi-distribués et modèles d'allocation des ressources en eau (Yates et al., 2005).

Dans cette étude, les prélèvements pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP), les besoins en eau pour l'agriculture et pour le cheptel ont été considérés comme usages principaux de l'eau du bassin versant du Nakanbé supérieur. Le débit environnemental n'a pas été

considéré du fait du caractère saisonnier du cours d'eau. En effet, en dehors des bordures des barrages où les activités socio-économiques sont pratiquées pendant la saison sèche aucune activité n'est pratiquée le long du cours en période d'étiage.

Les cinq retenues d'eau utilisées dans le cadre de notre étude ainsi que les forages qui servent à l'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya et ses environs ont été considérés comme site de captage d'eau. Le centre de production d'eau potable de la ville de Ouahigouya, les périmètres irrigués du bassin versant et les zones de pâturage ont été pris comme sites de demande d'eau.

2.5.1. Délimitation de la zone d'étude

La zone d'étude a été délimitée automatiquement à partir du logiciel WEAP. Il permet de télécharger les modèles numériques de terrain (SRTM) de résolution 90 m. Les données relatives à la couverture du sol issues du projet Land Cover (LC) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) Climate Change Initiative (CCI) » (ESA-CCI-LC) dans WEAP proviennent du satellite MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) et de PROBA-V et d'une combinaison de données « Advanced Very High Resolution Radiometer » (AVHRR) et SPOT-VGT pour créer une séquence complète de classification de la couverture terrestre couvrant la période entre 1992 et 2015 (24 ans) avec une résolution spatiale de 300m. Les centres urbains, les rivières, les sources d'eaux souterraines, les réservoirs, les sites d'agricultures et les autres usagers ont été numérisés à partir de la carte obtenue (Figure 5).

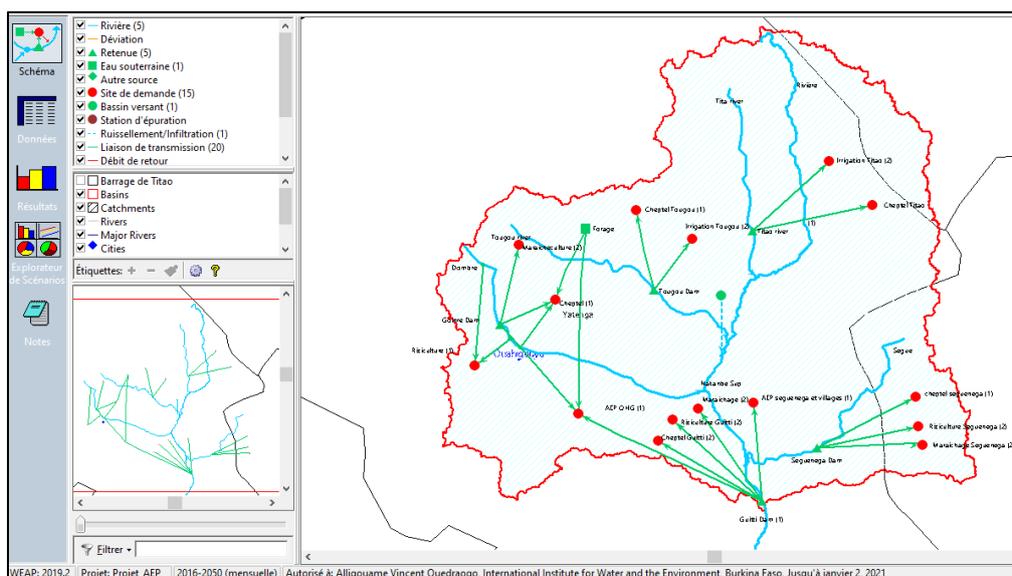


Figure 5: Structure du modèle WEAP pour le Bassin versant du Nakanbé supérieur

2.5.2. Réglage des paramètres généraux du modèle

Pour débiter la modélisation, les paramètres généraux du modèle ont été réglés et une année de compte courant ou année de référence a été créée. Dans cette étude, nous nous sommes limités entre 1980 et 2050 pour toutes informations sur le système. L'année 2017 a été prise comme année de compte courant du fait de la disponibilité des données pour l'ensemble des paramètres utilisés par le modèle. L'année 2050 a été choisie comme l'horizon à long terme pour développer les scénarios pour des affectations optimales de la ressource en eau.

2.5.3. Définition des sites de captage

L'application du modèle WEAP nécessite la connaissance des sources en eau disponibles dans le bassin versant. Les sites de captage dans le modèle représentent les sources d'approvisionnement en eau. Dans le bassin versant du Nakanbé supérieur, cinq (05) retenues (Goinré, Tougou, Titao, Séguénéga et Guitti) suivies par la DGRE et trente forages (30) ont été considérés comme sites de captage. Aussi, faut-il souligner l'existence d'autres retenues d'eau dans le bassin, mais compte tenu de l'indisponibilité des données hydrologiques ces ouvrages n'ont pas été pris en compte.

2.5.4. Définition des sites de demande d'eau

L'approvisionnement en eau potable des populations, les besoins en eau pour le cheptel et l'irrigation ont été considérés comme principaux usages de l'eau dans le bassin. Ainsi, les centres de production d'eau potables, les périmètres irrigués et les abreuvoirs ont été pris comme sites de demande d'eau.

2.5.4.1. Site de demande d'eau potable

L'ONEA dispose d'un centre de traitement à Ouahigouya qui exploite les eaux souterraines et les eaux de surface du barrage de Goinré mais aussi des eaux souterraines pour alimenter la population. Dans le projet de Guitti, il est prévu d'alimenter en plus de la ville de Ouahigouya et la commune de Séguénéga et les villages de Tilli, et Rigui. L'évaluation des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable a été faite sur la base des données démographiques issues du recensement générale de la population en 2006, du taux d'accroissement de 3% en milieu urbain et 2% en milieu rural. Aussi, une consommation spécifique journalière de 50l/j/habitant en milieu urbain et de 25l/j/habitant en milieux rural a été considérée (Tableau 3).

Tableau 3: population concernée par le projet Guitti

Localité	Population en 2006	Population en 2017	Besoin en eau (l/j)
Rigui	1752	2 178	54 460
Tilli	969	1 205	30 121
Séguénéga	18319	22 777	569 434
Ouahigouya	70956	98 220	4 910 985

2.5.4.2. Site de demande en eau agricole

Le bassin supérieur du Nakanbé est situé dans la zone sahélienne marquée par la variabilité spatiotemporelle de la pluviométrie avec pour conséquence la réduction des rendements agricoles. Pour pallier les problèmes liés à l'insécurité alimentaire, environs 113 ha de parcelles agricoles sont exploités autour du barrage de Goinré (dont 50% de façon informelle) pour des cultures pluviales (Riz, Maïs) et de contre saison. En outre, soixante-quinze (75) ha de terres sont aménagés autours du barrage de Séguénéga et soixante-dix (70) ha autours de barrage de Tougou.

L'estimation des besoins en eau des cultures a été faite à l'aide du logiciel CropWat en se basant sur la consommation des cultures les plus contraignantes (le riz en saison pluvieuse et la tomate en saison sèche).

2.5.4.3. Site de demande en eau pour le cheptel

L'évaluation des besoins en eau du cheptel a été faite sur la base de l'effectif du cheptel fournit par les services en charge de l'élevage (Tableau 4).

Tableau 4: Effectif du cheptel par site en 2006 et correspondance d'un UBT par espèce

		<i>Ovins</i>	<i>Bovins</i>	<i>Caprins</i>	<i>Asins</i>
<i>Localité</i>	UBT	0.08	0.75	0.08	0.54
	Séguénéga	48 255	20 797	57 246	10 879
	Ouahigouya	12 000	6 000	15 000	
	Titao	32 022	21 486	36 833	1 354
	Tougou	15905	815	19600	1525

Source : annuaire statistique 2006 du Ministère des ressources animales et halieutiques

Pour faciliter le calcul des besoins en eau, le cheptel a été converti en Unité de bétail Tropical (UBT). Une UBT correspond à un animal herbivore de 250 kg vif (www.fao.org) et la

consommation d'un tel animal est estimé à 40l/j. Le cheptel de la zone en 2020 a été estimé à l'aide du taux de croît par espèce (annexe).

$$P = P_0(1 + \alpha)^n \quad (11)$$

Où P désigne la population de l'espèce en 2016, P_0 désigne la population de l'espèce en 2006 et α représente le taux de croît de l'espèce.

2.5.5. Priorité d'allocation

Etant donné que plusieurs usagers peuvent exploiter la même source d'eau, il est nécessaire de définir des ordres de priorité d'allocation de chaque site de demande. Dans le modèle WEAP, les ordres de priorité sont définis de 1 à 100. Pour ce faire, WEAP satisfait d'abord les besoins en eau pour les sites prioritaires (1) avant de passer aux sites de priorité (2) et ainsi de suite jusqu'à satisfaire l'ensemble des demandes où à épuiser la source.

La loi d'orientation relative à la gestion de l'eau au Burkina Faso dispose en son article 23 que lorsqu'une sécheresse grave ou d'autres circonstances exceptionnelles ne permettent pas de satisfaire l'intégralité des besoins en eau, les besoins en eau qui correspondent à l'alimentation des populations et aux conditions élémentaires de la vie et de la dignité sont considérés comme prioritaire. Sur la base de cette disposition, les ordres de priorités suivants ont été fixés dans le cadre de ce travail : (i) priorité (1) correspond à l'approvisionnement en eau potable de la population ; (ii) la priorité (2) correspond à la satisfaction des besoins en eau du cheptel et l'irrigation.

2.5.6. Elaboration des scénarios

L'une des hypothèses que nous explorons suppose que la zone d'étude peut être sujette à un certain nombre de changements à court, moyen et long terme qui vont influencer négativement l'état futur des besoins et de la disponibilité en eau. L'augmentation de la population du bassin versant, l'augmentation des besoins en eau pour l'irrigation, l'augmentation du cheptel, les effets du changement climatique sur les ressources en eau, l'augmentation de l'érosion sont des modifications que le bassin est susceptible de subir.

Dans un premier temps, un scénario de référence est établi à partir de l'année de base. Dans l'année de base, nous avons analysé la capacité du barrage de Goinré et des sources d'eau souterraines actuellement exploitées par l'ONEA à satisfaire la demande. Le scénario de

référence suppose que pour tout l'horizon du projet les conditions climatiques, les besoins en eau et la demande restent constants et similaire à la situation de l'année de base. Par suite, des scénarios de type « “quoi si ?” » ont été établis, qui altèrent le scénario de référence et permettent d'évaluer les impacts possibles d'éventuel modification du climat ou de l'utilisation des ressources naturelles dans le bassin.

2.5.6.1. Scénario d'exploitation du barrage de Guitti

L'approvisionnement en eau potable des centres urbains de plus de 10 000 habitants est assuré par l'ONEA. Selon un entretien réalisé par PODA (2018) auprès des gestionnaires du centre de production d'eau de l'ONEA à Ouahigouya, l'AEP de la ville est assurée à partir du barrage de Goinré et de 13 puits à grand diamètre et 27 forages. Ces ouvrages permettent une production d'eau de 4200 m³/j dont 600 m³/j à partir du barrage.

En dépit de ces efforts les populations vivent des pénuries d'eau fréquentes qu'elles se sentent parfois obligées de dénoncer. Ainsi pouvait-on lire sur un article publié le 17 septembre 2018 sur le site <http://omegabf.info> : « Ouahigouya (Nord) : des femmes du secteur 2 manifestent contre une pénurie d'eau (correspondant).

Le projet Guitti a donc été conçu comme alternative pour pallier les problèmes d'eau de la ville de Ouahigouya et de ses environs.

Le scénario d'exploitation du barrage de Guitti suppose l'effectivité du projet à partir de l'année 2022. Le projet vise à couvrir les besoins en eau de 225 000 personnes dont 150 000 personnes nouvellement raccordées, issues des villes de Ouahigouya et de Séguénéga ainsi que des villages situés sur l'itinéraire Guitti-Ouahigouya. Il s'agira d'évaluer l'impact de ce projet, en association avec les sources d'eau actuelles, sur le niveau de satisfaction des besoins en eau à l'horizon 2050 sous l'influence de l'augmentation de la population et du changement climatique.

2.5.6.2. Scénario d'augmentation du nombre d'abonnés

La production annuelle de l'ONEA à Ouahigouya est passée de 954 067 m³ en 2006 à 1 510 283 m³ en 2016 soit un taux d'accroissement moyen de 4,7% en 10 ans. Le nombre d'abonnés par contre est passé de 1 632 à 6 985 sur la même période (soit un taux d'accroissement moyen annuel de 15,65% (DGESS/MEA, 2018).

Le scénario d'augmentation du nombre d'abonnés évalue le niveau de satisfaction des besoins en eau du système à l'horizon 2050 en supposant une augmentation de la production d'eau de 5% et du taux d'accroissement (20%) du nombre d'abonnés par rapport à la situation de référence.

2.5.6.3. Scénarii d'aménagement de 450 ha en aval du barrage de Guitti

De plus en plus, pour compenser les pertes de récoltes induites par les déficits pluviométriques, certains agriculteurs sont contraints de se réorienter vers les activités maraîchères autour des retenues d'eau dès la fin de la saison pluvieuse. La réalisation du barrage de Guitti va donc sans doute attirer de nombreux producteurs, raison pour laquelle le projet prévoit l'aménagement de 300 ha de terres à l'aval de la retenue pour la production rizicole et 150 ha pour les cultures maraichères.

Le scénario d'aménagement de 450 ha à l'aval du barrage de Guitti suppose l'aménagement effectif de ces terres et évalue son impact sur le niveau de couverture des besoins en eau des différents usagers à l'horizon 2050.

2.5.6.4. Scénario d'extension des périmètres irrigués au niveau des barrages

Compte tenu de la situation climatique de la zone, la présence d'une source d'eau importante constitue une zone d'attraction pour les agropasteurs. Pour prendre en compte cet aspect, une majoration de 10%, 200% et 40% des périmètres irrigués formel a été faite. Dans ce scénario, une analyse de la capacité du système à répondre aux besoins en eau des différents usagers a été faite jusqu'à l'horizon 2050. Les cultures les plus contraignante en termes de consommation d'eau sont le riz pour les cultures en saison des pluies et la tomate pour les cultures de contre saison. Les besoins en eau de ses deux plantes ont été estimés à l'aide du logiciel CropWat.

2.5.6.5. Scénario d'augmentation des dépôts solides dans les retenues d'eau

À sa réalisation en 1967, le barrage de Goinré avait une capacité de 19 888 000 m³. Les études de réhabilitation du barrage (DGIH,2018) ont révélé que sa capacité n'est plus que de 11 580 000 m³, soit une réduction d'environ 42% de sa capacité initiale. La sédimentation des retenues d'eau résulte des pertes en sol provenant de l'érosion (notamment hydrique) des bassins versants.

Aussi, est-elle une conséquence des mauvaises pratiques culturales en amont ou aux abords immédiats des retenues d'eau sans respect des bandes de servitudes.

Pour le barrage de Goinré les dégradations spécifiques sont estimées à environ 35 634,11 m³/an correspondant à une perte de la capacité de la retenue de l'ordre de 0,2% par an. Pour Guitti les pertes dues aux dépôts solides sont évaluées à près de 1 383 000 m³/an, soit 0.3% de la capacité du barrage.

Au regard de l'importance des activités agricoles dans le bassin, le scénario d'accroissement du taux d'envasement des retenues d'eau suppose une perte annuelle de la capacité des barrages de 0,5% pour les petites retenues et de 3% pour le barrage de Guitti du fait de l'érosion et des activités anthropiques nefastes. L'objectif est d'analyser l'impact des dépôts solides sur la disponibilité des ressources en eau.

2.5.6.6. Scénario des changements climatiques

Pour étudier la sensibilité du système aux scénarios climatiques, nous avons considéré les scénarios synthétiques (RCP4.5 et RCP8.5). En effet les projections sur le moyen terme montrent que les valeurs moyennes des températures globales simulées vont être quasi-similaires pour les scénarios RCP6.0 et RCP4.5 avec quelques différences par rapport au RCP2.6 sur le moyen terme. Le scénario RCP8.5 demeure le scénario le plus extrême avec des valeurs moyennes de température pouvant atteindre 2.6 °c sur le moyen terme. RCP2.6 est un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage radiatif très bas. Celui du RCP8.5 est un scénario à émissions de gaz à effet de serre très élevées.

Le principe a consisté à comparer les résultats issus de ces scénarios climatiques avec la situation de référence. Les données d'entrée nécessaires (pluviométrie, évaporation, température et humidité relative) ont été téléchargées à partir de la base de données du projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Ces données ont été corrigées par la méthode des quantiles Deltat Mapping avant d'être utilisées pour les simulations. Cette méthode consiste à utiliser la différence entre la moyenne mensuelle d'une variable simulée par un Modèle Climatique Global (MCG) sur une période de 30 ans dans le futur et la moyenne mensuelle de la variable simulée par ce même MCG durant la période de référence (1961-1990). Pour la température, le delta mensuel est additionné aux données climatiques quotidiennes. Dans le cas de variables qui sont soit positives, soit nulles telle la

précipitation, on applique le changement par un ratio. Les changements sont appliqués aux données climatiques quotidiennes synthétisées pour chaque bassin versant durant la période de référence. Pour chaque mois, la méthode de construction des séries climatiques s'exprime :

$$T_{scen} = (T_{fut} - T_{sim}) + T_{obs} \text{ et } P_{scen} = \left(\frac{P_{fut}}{P_{sim}}\right) * P_{obs} \quad (12)$$

- $T(P)_{obs}$ est la température (précipitation) moyenne observé d'un mois donné
- $T(P)_{scen}$ est la température (précipitation) moyenne projetée pour un mois donné
- $T(P)_{fut}$ est la température (précipitation) moyenne simulé sur la période 2016-2050
- $T(P)_{sim}$ est la température (précipitation) moyenne sur la période de référence 1980-2016

2.5.7. Scénario de recours aux technologies innovantes

Dans le cas où les différents scénarii proposés ne garantissent pas la durabilité des ressources en eau, des recours à de nouvelles technologies où approches pour préserver ou minimiser les pertes en eau s'avèrent nécessaire. Dans ce chapitre nous considérons les techniques d'irrigation qui minimisent au mieux la consommation d'eau, adaptées aux conditions du milieu et acceptées par les usagers.

Dans le bassin versant du Nakanbé supérieur, l'irrigation gravitaire est la plus utilisée sur les périmètres irrigués règlementaires et parfois à travers les motopompes pour les exploitants anarchiques. Au barrage de Guitti par exemple c'est le système gravitaire qui a été prévu pour les aménagements futures. Les techniques d'irrigation goutte à goutte et par micro aspersion qui font l'objet d'une vulgarisation au Burkina Faso pourraient être utilisées. Bien qu'elles nécessitent plus d'entretien et d'investissement que l'irrigation gravitaire, leurs efficacités peut atteindre 90% ou plus contre 50 à 70% pour l'irrigation gravitaire. Le scénario « nouvelle technologie agricole » suppose une réduction de la consommation d'eau de 30% par le recours à l'irrigation goutte à goutte ou par aspersion sur 50% des exploitations.

2.5.8. Indicateur de mesure de changement entre les scénarios futurs et celui de référence

La comparaison de l'écart entre les résultats simulés et celui de la période de référence a été estimé à partir du taux de variation donné par :

$$\text{Var} (\%) = \frac{\bar{X}_{\text{horizon}} - \bar{X}_{\text{référence}}}{\bar{X}_{\text{référence}}} * 100 \quad (13)$$

\bar{X}_{horizon} Représente la valeur moyenne de la série X à l'horizon considéré et $\bar{X}_{\text{référence}}$ est la valeur moyenne de la série X sur la période de référence.

2.5.9. Calage des modèles

Le calage consiste à déterminer à partir des données historiques, les paramètres du modèle qui conduisent à la plus faible erreur possible entre les paramètres observés et ceux obtenus à partir du modèle après simulation. L'ajustement des paramètres se fait par essai et analyse des résultats obtenus par rapport aux résultats précédents. En plus de l'appréciation visuelle des résultats du calage, les critères de performances interviennent pour donner une appréciation quantitative des résultats du calage.

2.5.10. Validation du modèle

La validation du modèle a été faite à l'aide d'un nouvel ensemble de données allant de 2006 à 2018. Compte tenu de la rupture observée en 2006, le test de répartition différentielle de l'échantillon a été utilisé pour la validation du modèle. Nous rappelons que la nouvelle série (2006-2018) n'a pas été utilisée lors du calage du modèle. la validation a consisté à vérifier le calage qui a été fait précédemment et de conclure si le modèle peut être utilisé en opérationnel dans le bassin d'étude. Pour cela les paramètres d'entrée (Kc, CRS, FRR, ZCR et DPE) issus du calage ont été introduit dans le modèle pour la simulation de la période 2006-2018 et la réponse a été comparée aux débits observés à l'aide des critères de performances (Nash, PBIAIS, RMSE, et du coefficient de corrélation).

2.5.11. Critères de performances

2.5.11.1. Critère de performance de NASH

Le critère de performance de Nash quantifie la précision des simulations. Il est donné par :

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{jstim} - Q_{jobs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (14)$$

Ce critère permet de mesurer le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées. Le critère de NASH peut varier de $-\infty$ à 1. La valeur optimale (estimation parfaite) est un (1). Une

valeur nulle signifie que le modèle n'est meilleur que si on avait remplacé toutes les valeurs simulées par le débit moyen (Nash, 1970). On considère classiquement que la simulation est bonne lorsque ce coefficient tend vers un (1) à valeur positive.

2.5.11.2. Coefficient de corrélation (ρ)

Le coefficient de corrélation est exprimé à travers la formule suivante :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{jsim} - \bar{Q}_{sim})(Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{jsim} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (15)$$

Ce critère mesure la Co-fluctuation des séries simulées et observées (Tsakiris et al., 2008). Si ρ est égal à 1 on a une corrélation parfaite entre les deux variables étudiées.

2.5.11.3. Le BIAIS ou erreur moyenne

Le BIAIS est donné par la formule suivante :

$$BIAIS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - Q_{jsim})}{\bar{Q}_{obs}} * 100 \quad (16)$$

Le biais est encore appelé erreur moyenne. Si le BIAIS est positif cela signifie que les débits observés sont surestimés par rapport au débit simulé et inversement.

2.5.11.4. Erreur Quadratique (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{jsim} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (17)$$

Où Q_{jsim} et Q_{jobs} désignent respectivement les débits simulés et observés au jour j.

\bar{Q}_{sim} et \bar{Q}_{obs} indiquent respectivement le débit moyen simulé et le débit moyen observé de la période 2002-2009.

2.6. Estimation des débits d'entrée dans les barrages

Les débits entrant dans les cinq barrages (Guitti, Titao, Tougou, Goinré et Séguénéga) ne sont pas connus. Pour ce faire, le modèle hydrologique GeoSFM a été calé et validé à la station hydrométrique de Rambo. En supposant que les paramètres physiques du bassin versant sont uniformes, nous avons déterminé les débits entrant dans chaque barrage avec les valeurs du calage de la station de Rambo.

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Résultats de l'étude

1.1. Analyse des données pluviométriques

Dans le cadre de cette étude, une série historique des données pluviométriques allant de la période 1980-2018 ont été collectées sur l'ensemble des six stations pluviométriques (Ouahigouya, Gourcy, Baraboulé, Bourzanga, Kiembara et Pobé-Mengao) du bassin versant. Une analyse de ces données fait ressortir que seule la station de Ouahigouya ne présente aucune lacune (annexe 8). Les données manquantes dans les autres stations ont été corrigées sur la base de la méthode du vecteur régional (annexe 9). La méthode du vecteur des indices annuels de précipitations a été mise en œuvre dans le but de combler les lacunes de certaines stations pluviométriques. Les résultats ont été validés par le test de FISHER (F test) et montrent une relation significative au seuil de 1 % entre les données observées et celles calculées. Sur la base des résultats obtenus, les lacunes ont été comblées par les valeurs calculées et qui ont permis d'obtenir des séries de données complètes sur la période d'étude (1980-2018). Ces données ont servi au calcul des indices standardisés de précipitations (IPS) et à l'application des tests de rupture.

La station de Ouahigouya a été choisie comme station de référence pour l'étude d'homogénéité des stations de Baraboulé, Bourzanga, Gourcy et Pobé-Mengao. L'étude d'homogénéité fait ressortir que les données pluviométriques de la station de Gourcy sont homogènes (Figure 6). Contrairement aux données pluviométriques de la station de Gourcy, celles des stations de Baraboulé, Bourzanga et Pobé-Mengao sont hétérogènes (Figure 7).

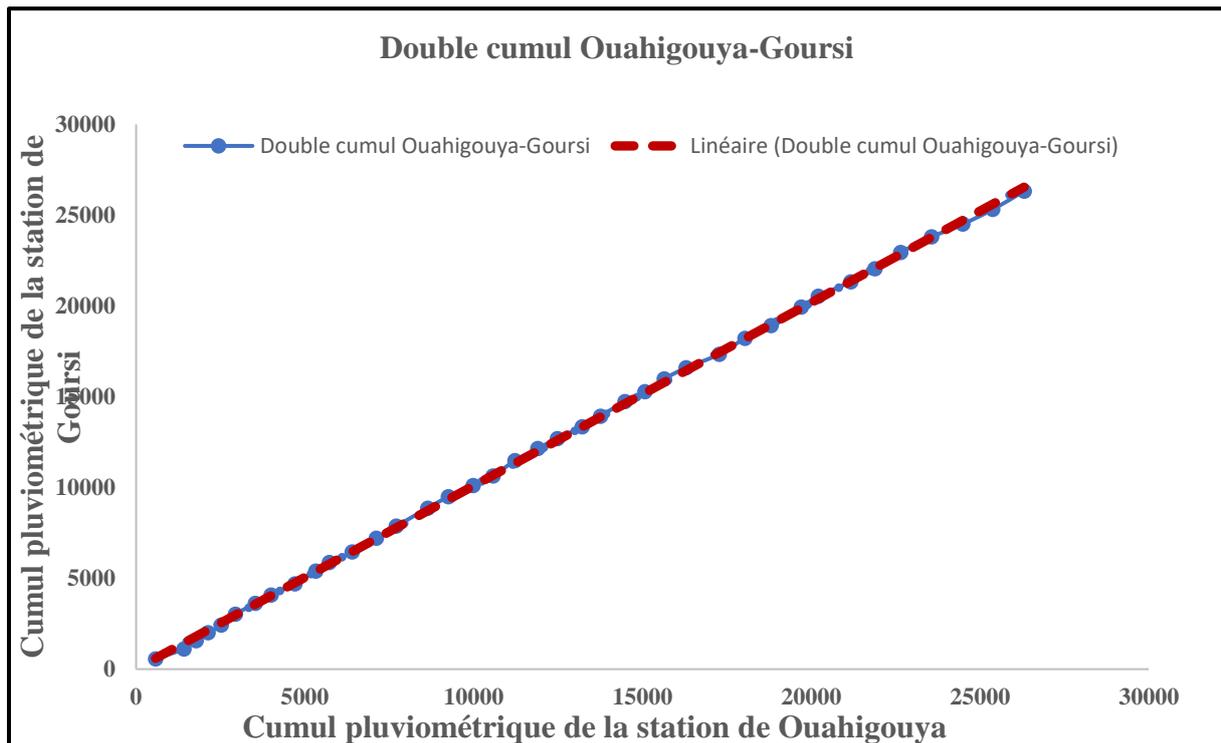


Figure 6: Test d'homogénéité de la station de Gourcy

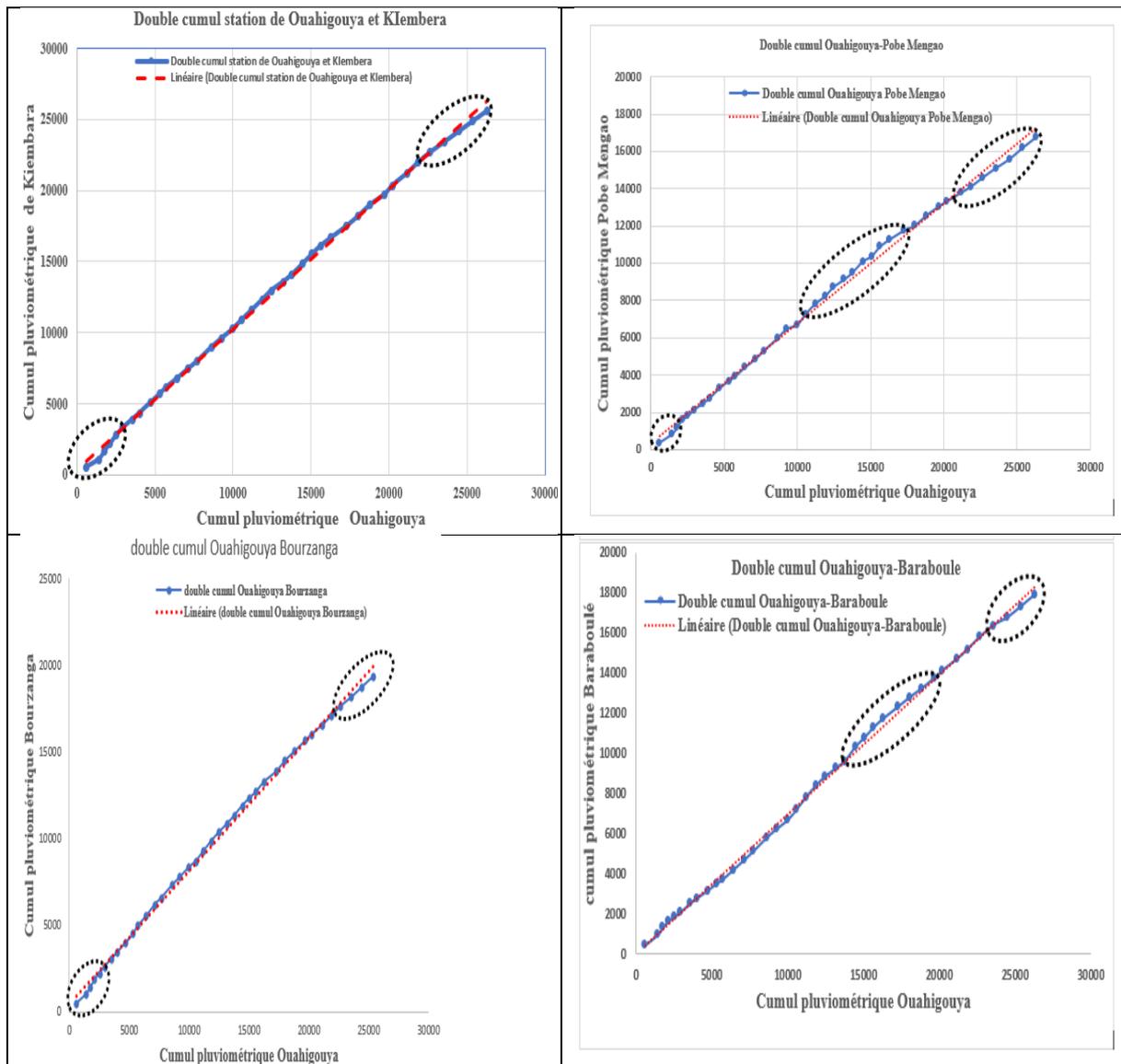


Figure 7: Test d'homogénéités des stations de Baraboulé, Bourzanga, Kiembara et Pobe-Mengao

Les stations sur lesquelles, l'homogénéité des données n'est pas vérifiée, une correction des données a été faite par multiplication des valeurs de la période à corriger par le rapport de la pente de la droite juger homogène par rapport à celle de la partie à corriger (Figure 8).

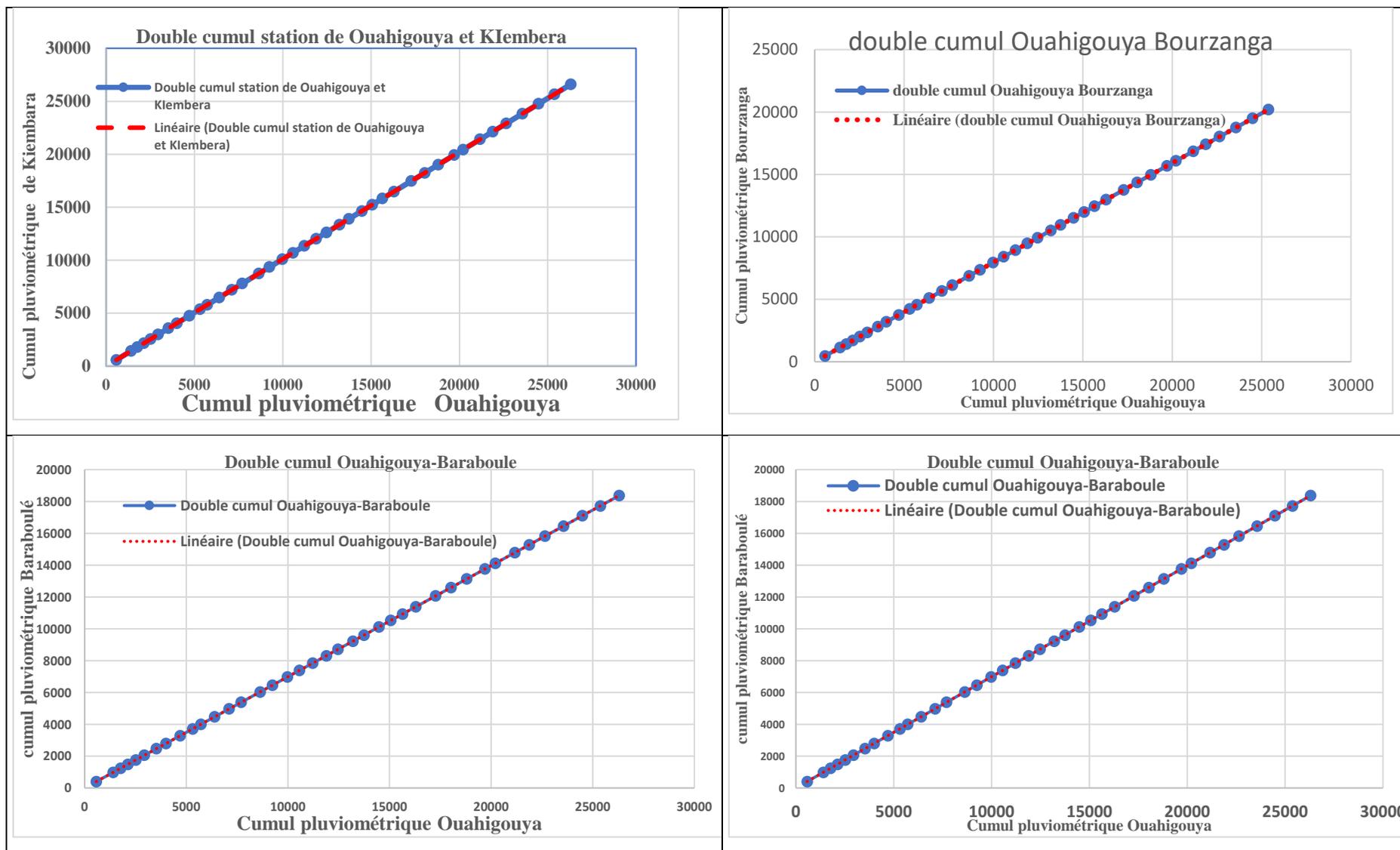


Figure 8: Test d'homogénéité après correction des données

1.2. Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

Les tests de corrélation sur le rang et d'autocorrélation appliqués sur les données pluviométriques annuelles montrent sur l'ensemble des stations pluviométriques du bassin versant que pour des seuils de confiances de 99%, 95% et 90%, ces données n'ont pas un caractère aléatoire (Figure 9). L'hypothèse alternative (celle d'une tendance) du test de corrélation sur le rang est donc vérifié.

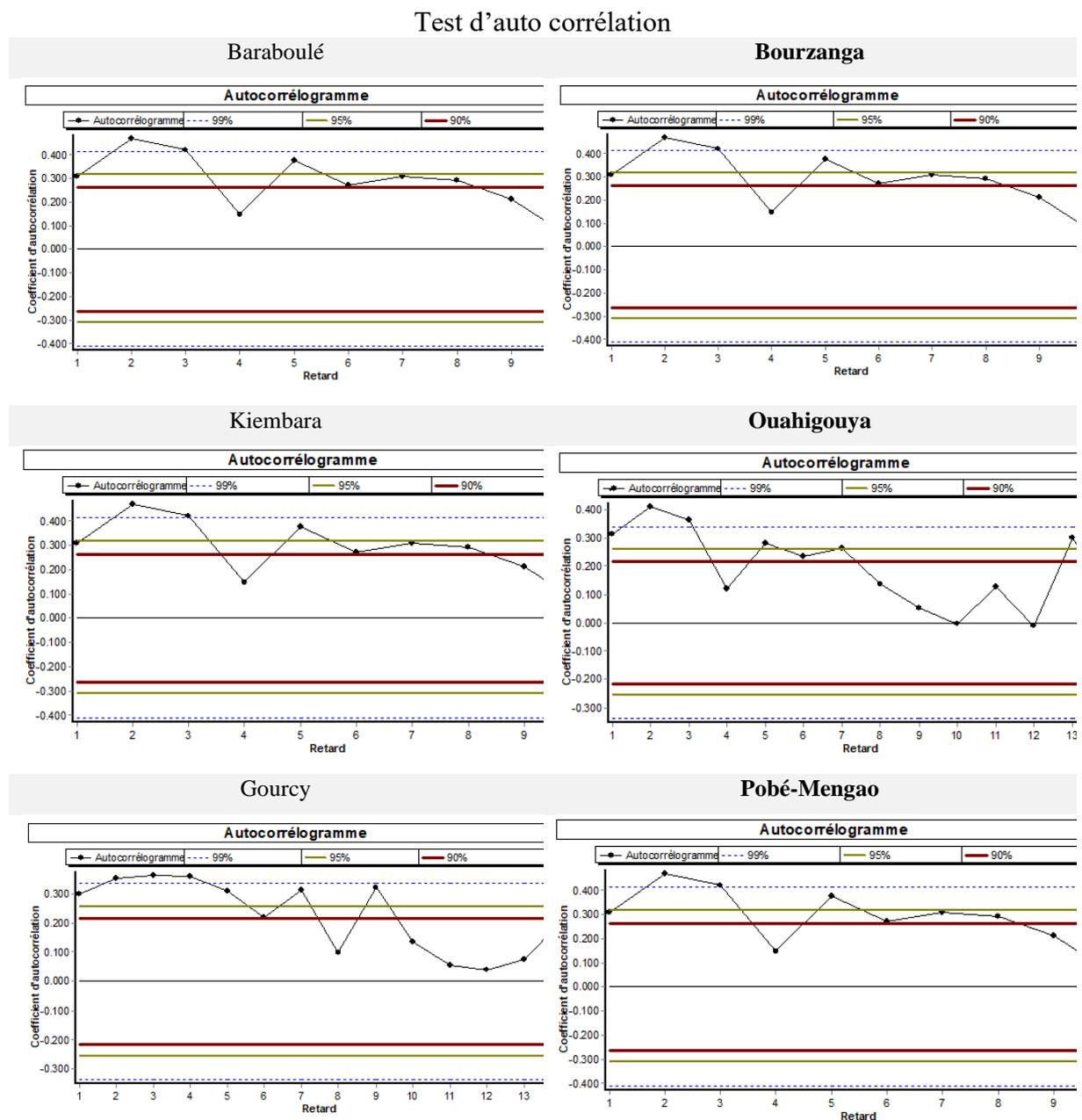


Figure 9: Test d'autocorrélation

Les résultats des différents tests permettent de constater qu'à l'échelle du bassin, les séries pluviométriques analysées présentent des ruptures. Selon le test de Pettitt, une rupture est

survenue en 2006 pour les stations de Ouahigouya, Baraboulé, Bourzanga, Kiembara et Pobé-Mengao tandis qu'elle s'est survenue en 1991 pour la station de Gourcy. Le test de LEE et de HEGHINIAN et celui de HUBERT confirment également ces mêmes dates de rupture (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Tableau 5: Dates de rupture dans les séries pluviométriques allant de la première rupture

Station	Rupture selon le test de selon PETTIT	Moyenne et Ecart-Type avant et après Rupture			
		Série 1		Série 2	
		M ₁	σ ₁	M ₂	σ ₂
Barboule	2006	421.5	97.8	582.4	95.5
Bourzanga	2006	480.3	111.8	664.2	109.2
Gourcy	1991	537.4	89.8	736.1	141.9
Kiembara	2006	610.1	142.7	843.7	138.7
Ouahigouya	2006	603.4	140.5	837.5	137.3
Pobé-Mengao	2006	399.4	93	552.3	90.8

Note : moyenne avant rupture (M1), Moyenne après rupture (M2), σ₁ écart-type de la période avant rupture, σ₂ écart-type de la période après rupture

Le déficit/excédent calculé au niveau de chaque station fait ressortir une valeur positive et qui traduit une tendance à la hausse des précipitations à partir de 1991 pour la station de Gourcy, et à partir de 2006 pour les autres stations (Tableau 6).

Tableau 6: Taux de variation pluviométrique

Station	Année de rupture	Déficit
Barboule	2006	0.382
Bourzanga	2006	0.383
Gourcy	1991	0.370
Kiembara	2006	0.383
Ouahigouya	2006	0.388
Pobé-Mengao	2006	0.383

1.3. Indices standardisés de pluies

Les indices standardisés de précipitation calculés sur la période 1980-2018 au niveau des six stations pluviométriques font ressortir trois grandes périodes. Une période de sécheresse modérée de 1980 à 1990, une période d'alternance entre années sèches et années humides sur la période 1991-2006 et une période humide et modérée de 2006 à 2018. D'une manière générale, les indices standardisés de précipitation calculés sur la période 1980-2018 sur

l'ensemble des stations fait ressortir une tendance à la hausse des précipitations sur le bassin. Cette tendance vient confirmer les résultats obtenus avec les différents tests statistiques (Figure 10).



Figure 10: Indices standardisés de pluie sur les six stations pluviométriques du bassin versant

1.4. Termes du bilan hydrologique du bassin versant

La pluviométrie moyenne interannuelle évaluée par la méthode de Thiessen dans le bassin versant est de 565,82 mm soit un volume d'eau de 2739,7 millions de m³ à l'échelle du bassin versant. Le ruissellement moyen interannuel de 1983 à 2016 est estimé à 3.3 m³/s à la station de Ramsa soit un volume moyen écoulé de 104.06 millions par an. Rapporté à l'échelle du bassin versant du Nakanbé supérieur, la lame d'eau ruisselée est estimée à 21.5 mm.

Le déficit estimé à travers la formule de Coutagne est de 340 mm contre 375 mm pour la formule de Turc.

1.5. Ressources en eau disponibles dans le bassin versant

Le bassin supérieur du Nakanbé compte de nombreuses retenues d'eau dont six (06) mares, dix-neuf (19) boulis et trente-six (36) barrages mobilisant au total 112, 46 millions de m³. Parmi ces ouvrages le barrage de Goinré (11,2 millions m³) est actuellement exploité pour l'approvisionnement en eau potable (AEP) de la ville de Ouahigouya, en appui aux sources d'eaux souterraines exploitées par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) sur place. Par ailleurs, la plus importante retenue d'eau en termes de capacité de stockage est celle de Guitti avec 43,7 millions de m³ réalisé en 2017 dans le cadre du futur projet d'approvisionnement en eau potable des villes de Ouahigouya, Séguénéga ainsi que les villages situés sur l'itinéraire Goinré-Ouahigouya, long d'environ 70 km. Au regard de l'importance des activités menées autour des retenues d'eau, cinq d'entre elles (dont Goinré et Guitti) qui retiennent 64% des ressources en eau du bassin ont été choisies pour l'évaluation du niveau de satisfaction des besoins en eau des usagers actuels et futures.

1.6. Contribution actuelle du barrage de Goinré à l'AEP Ouahigouya

Au recensement général de la population de 2006, la population de la ville de Ouahigouya était estimée à 86 153 habitants. Sur la base d'un taux d'accroissement de 3% l'an, cette population atteindra 105 021 habitants en 2016. En termes de besoins en eau pour la consommation humaine, sur la période 2010-2016, le barrage de Goinré a contribué pour 9% aux prélèvements d'eau brute, soit 129 955 m³, contre 1 460 053 m³ pour les forages exploités par l'ONEA pour l'AEP de la ville de Ouahigouya (DGESS/MEA, 2018).

Il faut noter que ce barrage, initialement était à vocation agricole, où 51 ha de terres ont été aménagés à l'aval. Toutefois, avec l'augmentation de la population 61,18 ha supplémentaires sont actuellement exploités aux alentours du plan d'eau par des exploitants informels, portant à 112,18 ha les terres irriguées à partir des ressources en eau du barrage. Les besoins en eau, toutes spéculations confondues s'élèvent à **11 106 m³/ha/an** soit **1 243 867 m³/an**.

La retenue de Goinré sert également à abreuver du bétail, dont les besoins en eau sont évalués à 128 286 m³ par an pour un total de 8 787 UBT (Figure 11).

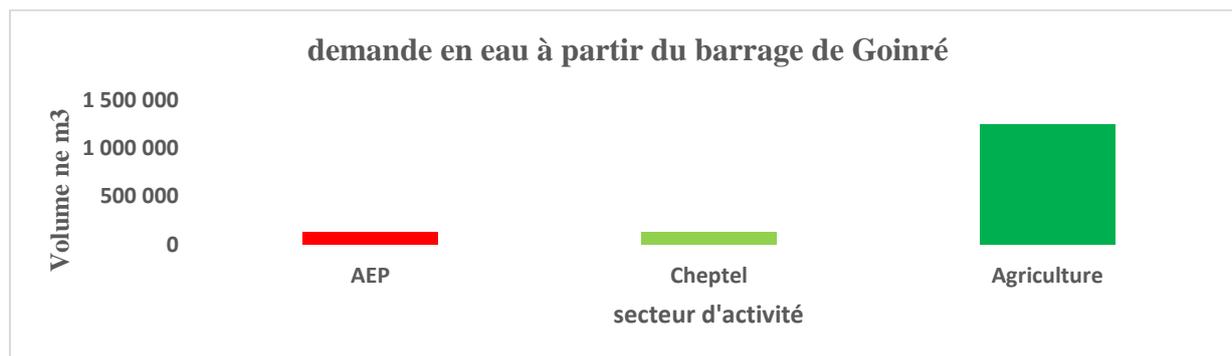


Figure 11: Demande en eau des usagers au barrage de Goinré

1.7. Demande en eau au barrage de Ouahigouya

La demande en eau au niveau du barrages de Ouahigouya est estimée à 1 950.7 milliers de m³ et destinée aux activités agropastorales.

En moyenne 24 285 UBT s'abreuvent au barrage de Ouahigouya pour une consommation moyenne en eau de 354 557 m³. Les cultures de contre saison pratiquées autour du barrage de Ouahigouya sont les plus consommatrices d'eau. Les spéculations les plus cultivées sont la tomate (88.5 ha), le haricot vert (7.18 ha) et la pomme de terre (4.25 ha) pour une consommation moyenne annuelle de 1 596 186 m³ représentant 82% des besoins en eau au niveau du barrage de Ouahigouya (Tableau 7).

Tableau 7: Demande en eau en millier de m³ au barrage de Ouahigouya

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Total
Cheptel (m3/mois)	30.1	27.2	30.1	29.1	30.1	29.1	30.1	30.1	29.1	30.1	29.1	30.1	354.6
Tomate (1er saison)	99.3	111.9	123.6	25.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.4	58.0	1 596.2
Tomate (2er saison)	0.0	124.5	198.1	278.1	278.5	117.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Pomme de terre	11.2	11.5	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	6.1	
Haricot (1er saison)	19.1	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	15.3	
Haricot (2er saison)	0.0	8.8	18.6	20.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total	159.8	291.3	378.8	353.3	309.2	146.7	30.1	30.1	29.1	30.1	82.7	109.5	

1.8. Demande en eau des usagers du barrage de Titao

Le barrage de Titao est à vocation agropastorale. D'une capacité de 5.8 millions de m³, il se remplit généralement toutes les saisons pluvieuses.

En période de contre saison, la tomates (25.05 ha) ; le chou cabus (5.53 ha), le poivron (5.5 ha), le piment (0.75 ha), oignon (62.5 ha), l'ail (6 ha), la laitue (0.75 ha), aubergine (0.25 ha), maïs (20.5 ha) et pomme de terre (64 ha) sont les spéculations les plus cultivées au niveau des

périmètres irrigués du barrage de Titao. Les besoins en eau annuelle toutes spéculations confondues s'élèvent à 2.085 millions de m³(Tableau 8).

On estime en moyenne 28 599 UBT qui s'abreuvent dans la retenue avec une consommation annuelle en eau estimée à 417 549 m³.

Tableau 8: Demande en eau au niveau du barrage de Titao en millier de m³

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Total
Besoin en eau de culture	400	407	404	118	88	106	2	7	12	14	182	345	2085
Besoin en eau du cheptel	35	32	35	34	35	34	35	35	34	35	34	35	418
Besoin total	435	439	439	153	123	140	37	43	46	49	216	381	2503

1.9. Demande en eau des usagers du barrage de Tougou

D'une capacité de **4,27** millions de m³, le barrage de Tougou a un potentiel agricole de 40 ha dont **9,5** ha en saison pluvieuse et **30,5** ha en culture de contre saison. Outre les périmètres irrigués, près de **29 892** UBT s'abreuvent quotidiennement dans le barrage.

La demande en eau totale au niveau de ce barrage est estimée à **1,086 millions** de m³ dont **650 192 m³** destinés aux activités agricoles contre **436 426 m³** pour le cheptel (Tableau 9).

Tableau 9: Demande en eau au barrage de Tougou e millier de m³.

	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Total
Légume 1 ^{er} cycle	52.1	58.7	64.8	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.3	30.4	242.61
Légume 2eme cycle	0.0	30.2	36.8	64.9	68.3	47.6	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	250.91
Riz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.4	8.1	4.6	10.1	17.1	0.0	0.0	83.26
Mais	24.9	24.3	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	11.8	73.41
Total des besoins en eau pour l'agriculture													650, 19
Cheptel	37.1	33.5	37.1	35.9	37.1	35.9	37.1	37.1	35.9	37.1	35.9	37.1	436.42
Total	114.0	146.7	148.1	114.2	105.3	126.9	48.2	41.7	45.9	54.2	62.2	79.3	1086.62

1.10. Demande en eau des usagers au barrage de Séguénéga

Le barrage de Séguénéga a une capacité de 2.8 millions de m³. Il a une vocation agropastorale.

L'évaluation des besoins en eau pour les activités agropastorales s'élève à 569,9 milliers de m³ dont 274,4 milliers de m³ pour l'agriculture et 295, 5 millions de m³ pour le cheptel (Tableau 10).

Tableau 10: demande en eau au niveau du barrage de Séguénéga

	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Total
Légume 1er cycle	14.0	15.8	17.4	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	8.2	65.2
Légume 2ème cycle	0.0	8.1	12.9	18.1	18.2	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.0
Haricot 1er cycle	13.3	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	10.7	33.8
Haricot 2ème cycle	0.0	5.1	13.7	16.1	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.7
Maïs 1er cycle	8.4	6.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	6.1	23.5
Maïs 2ème cycle	0.0	2.3	7.7	10.1	7.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27.5
Riz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	1.7	1.0	2.1	3.6	0.0	0.0	17.5
Besoin en eau agricole													274.4
Cheptel	25.1	22.7	25.1	24.3	25.1	24.3	25.1	25.1	24.3	25.1	24.3	25.1	295.5
Total	60.9	65.3	77.4	72.2	57.4	41.3	26.8	26.1	26.4	28.7	37.5	50.1	569.9

1.11. Besoins en eau des usagers du barrage de Guitti

La vocation première de cet ouvrage est l'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya, de la commune de Séguénéga et des localités situées sur l'itinéraire Guitti-Ouahigouya. A partir des données socio-économiques recueillies auprès de la mairie de Ouahigouya, et des données statistiques de l'ONEA, les besoins en eau pour l'approvisionnement en eau potable s'élèvent à 4,2 millions de m³.

Outre la production en eau potable, il est prévu un aménagement rizicole de 300 ha en aval du barrage et 150 ha pour les cultures maraichères en contre saison dont les besoins en eau sont estimés à 6.14 millions de m³.

La demande en eau pour le cheptel est estimée à 0,6 millions de m³(

Tableau 11).

Tableau 11: Demande en eau au barrage de Guitti en millions de m³

	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Total
Riz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.12	0.32	0.67	0.66	0.00	2.87
Culture maraichère (1er cycle)	0.40	0.41	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.26	1.58
Culture maraichère (2nd cycle)	0.00	0.21	0.34	0.47	0.47	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
Besoin Agricole													6.14
Besoin en eau AEP	0.35	0.32	0.35	0.34	0.35	0.34	0.35	0.35	0.34	0.35	0.34	0.35	4.11
Cheptel	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.60
Total	0.79	0.98	1.06	0.86	0.87	0.58	1.50	0.52	0.70	1.07	1.23	0.66	10.82

1.12. Application du modèle WEAP au bassin supérieur du Nakanbé

1.12.1. Calage du modèle WEAP

Le but du calage du modèle consiste à ajuster les paramètres physiques du bassin de sorte à ce que les débits simulés se rapprochent au mieux des débits observés. L'analyse subjective des résultats de simulation avec les paramètres physiques par défaut pour la période 2007-2016 du bassin montre que les débits simulés ne sont pas bien superposés avec les débits observés. L'analyse objective basée sur le développement des mesures quantitatives (mauvais indicateurs des critères de performances) de la qualité de l'ajustement vient confirmer ce constat (Figure 12, Tableau 12).

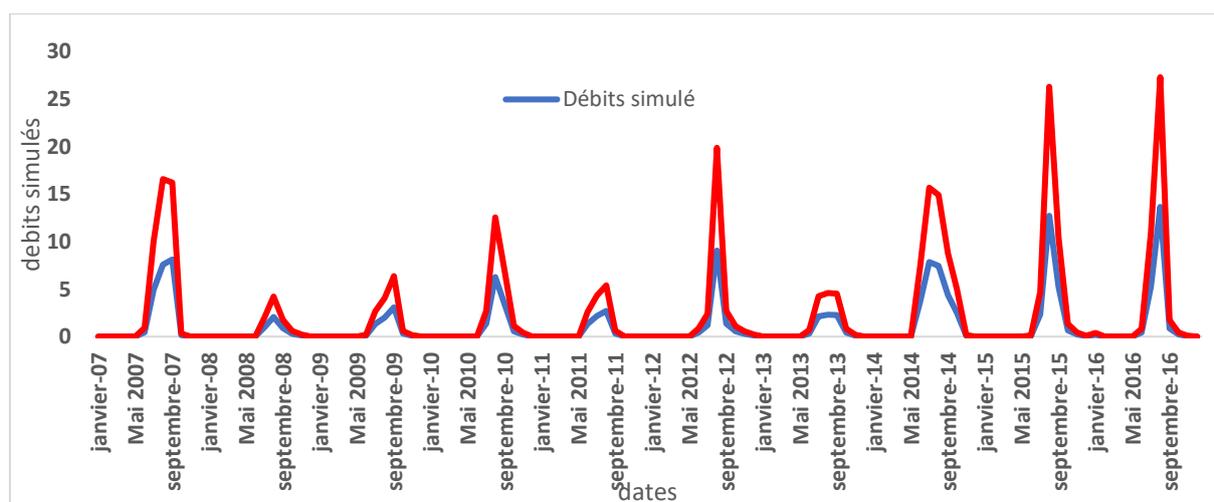


Figure 12: hydrogramme simulé et observé sans ajustement des paramètres du modèle

D'une manière générale, les débits simulés sont sous-estimés par rapport aux débits observés. Le calage a consisté à trouver les valeurs de certains paramètres physiques du sol pour augmenter les écoulements simulés au niveau du bassin versant (Tableau 12). Après modification de ces paramètres, l'analyse subjective et objective ont donné des résultats concluants avec un coefficient de Nash (NSE) de l'ordre de 0.9 au calage et 0.83 à la validation. Les trois autres critères (PBAIS, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (SDR) donnent également des résultats très satisfaisants (Tableau 13).

Tableau 12: Paramètres modifiés au calage du modèle

	Valeurs par défaut				Valeurs à la validation			
	KC	SWC (mm)	DWC (mm)	DC (mm)	KC	SWC (mm)	DWC (mm)	DC (mm)
Agriculture	1	1000	500	20	0.6	100	300	0.1
Prairie	1	1000	500		0.2	1000	300	0.1
Steppe	1	1000	500		0.1	1000	300	0.1

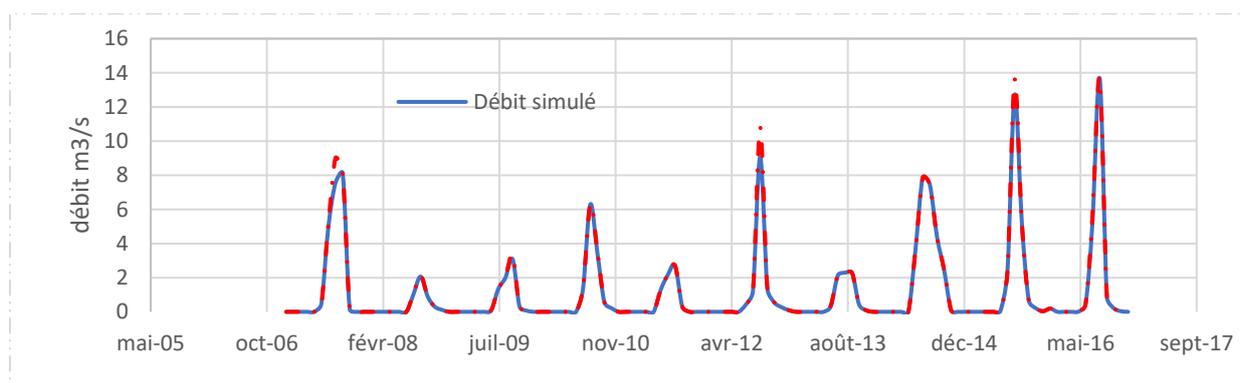


Figure 13: Hydrogramme simulé et Observé au calage (2007-2016)

Appliquer sur la période 1988-1998, prise pour la validation, les résultats de cette nouvelle simulation ont été concluants avec de bonnes valeurs de critères de performances (Tableau 13) et l'hydrogramme simulé reproduit plus ou moins fidèlement l'hydrogramme observé (Figure

14).

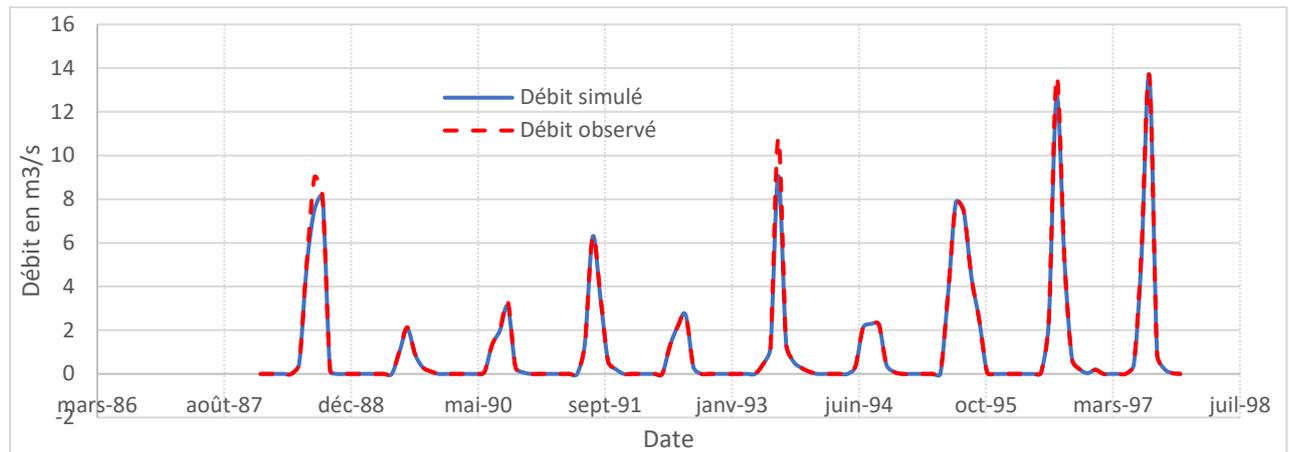


Figure 14: hydrogramme observé et simulé à la validation (1988-1998)

Tableau 13: Valeur des paramètres physiques avant et après calage

CRITERE DE PERFORMANCE	PAR DEFAUT	CALAGE	VALIDATION	VALEUR DE REFERENCE
RMSE	2.08	0.96	0.86	> 0,7
NASH	-1.59	0.9	0.83	> 0,5
PBIAIS	-120.20	3.62	13.07	±25%
RSR	2.59	1	1.07	$0,9 \leq RSR \leq 1,7$

1.12.2. Calage du modèle GEOSFM

Sur l'ensemble des cinq (05) retenues d'eau que nous disposons, aucune station de mesure n'est installée à l'entrée de chaque retenue. Pourtant le modèle WEAP a besoin de ces données pour évaluer le remplissage de chaque retenue. Pour ce faire le modèle semi distribué GeoSFM a été sollicité. La pluie et l'ETP sont les principales données d'entrée de ce modèle.

Les écoulements ont été simulés à la station de Rambo pour un seuil de 700. Les résultats obtenus sur la période 2007-2017 ont été comparés avec les débits jaugés à la station de Rambo (Figure 15). Les débits simulés obtenus ne sont pas reproduits de manière satisfaisante comme le montrent les critères les valeurs des critères de performances (NAHS=0.5, ρ =0.87, BIAIS=-0.66 et RMSE=60.5).

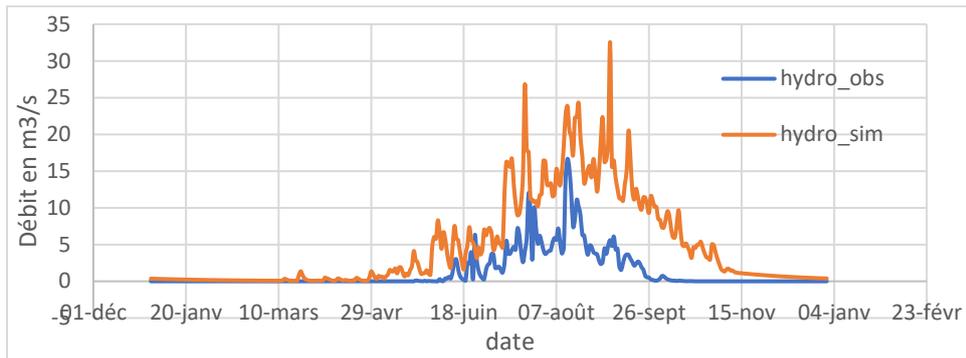


Figure 15: hydrogramme moyen simulé et observé à la simulation

Après la modification des paramètres physiques (SoilWHC , SoilDepth, Ks, Baseflowlag, basinLoss et Pencoﬀ,) (Tableau 15), l'hydrogramme simulé reproduit plus fidèlement l'hydrogramme observé par rapport aux valeurs par défaut et les critères de performances ce sont améliorés , sauf que l'étiage est retardé au niveau des débits simulés (Figure 16, Tableau 14).

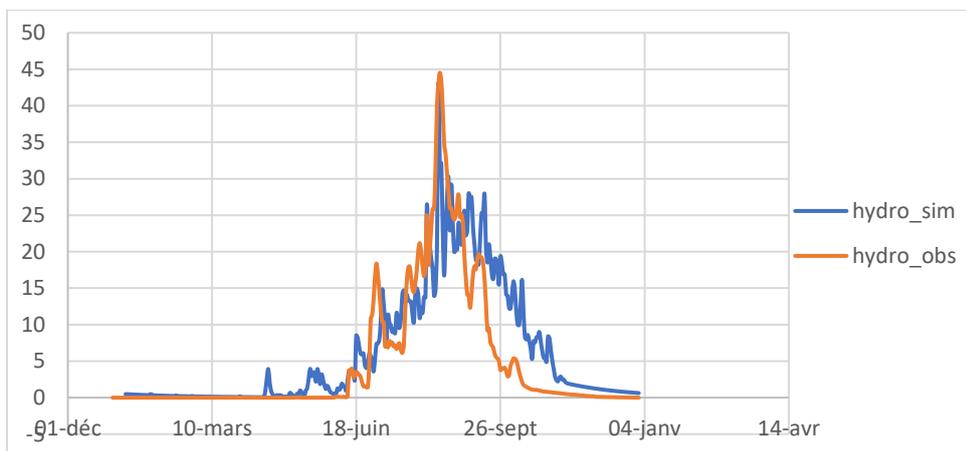


Figure 16: : hydrogramme simulé et observé au calage

Tableau 14: Critères de performances au calage

Critère de performances	Par défaut	Calage	Validation
NASH	0.5	0.79	0.7
BIAIS	0.66	0.07	0.12
ρ	0.87	0.89	0.8
RMSE	60.5	3.99	5.45

Tableau 15: paramètres physiques du bassin après calage

	SoilWHC	SoilDepth	Ks	Baseflowlag	BasinLoss	Pancoeff
Valeur par défaut	87.14	175.00	5.08	365.00	0.40	0.85
Valeurs à la validation	100.00	200.00	4.00	150.00	0.60	0.75

1.12.3. Niveau de satisfaction des besoins en eau actuels des usagers du barrage de Goinré

La demande en eau totale pour l'approvisionnement en eau potable, le cheptel et l'agriculture est estimée à 2,84 millions de m³ dont 1,38 millions de m³ fourni par le barrage et 1,46 millions de m³ à partir des forages. L'analyse de la situation actuelle « 2016 » fait ressortir que les besoins en eau de tous les usagers sont entièrement couverts (Figure 17).

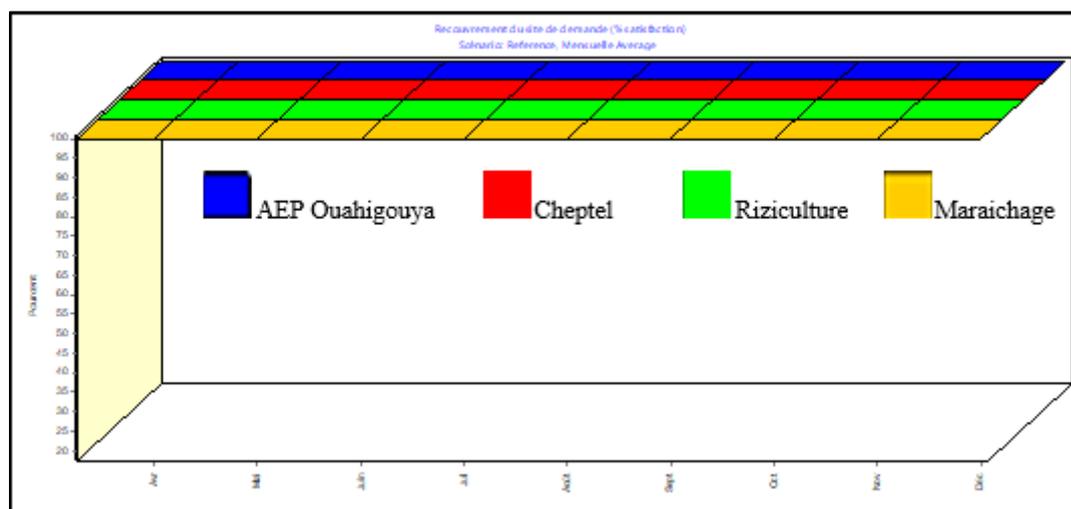


Figure 17: Niveau de satisfaction des besoins en eau de Goinré en 2016

En supposant que sur la période 2016-2050, les conditions climatiques restent similaires à celles de l'année de base (2016) et que le nombre d'usagers du barrage de Goinré ne varient pas l'analyse du niveau de satisfaction de la demande en eau fait ressortir deux périodes : celle de 2016-2030 où l'ensemble des besoins en eau est satisfait et celle de 2030-2050 où seuls les besoins en eau pour l'AEP et le cheptel sont couverts. Les autres besoins connaîtront des déficits allant de 400 mille m³ par an pour la riziculture à 460 mille m³ par an pour les cultures maraichères (Figure 18).

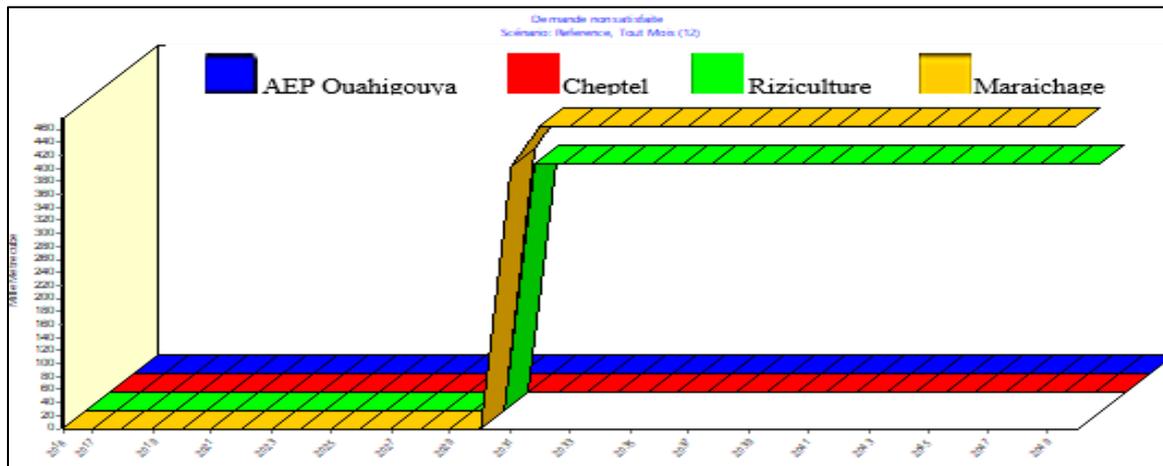


Figure 18: Niveau de satisfaction de la demande en eau des usagers de Goinré sur la période 2016-2050

Le déficit pour la riziculture se fait beaucoup ressentir pendant le mois de juin correspondant à la période de pépinière. A cette période de l'année, le barrage de Goinré est généralement à son niveau le plus bas alors que la saison pluvieuse ne s'est pas encore installée (Figure 19).

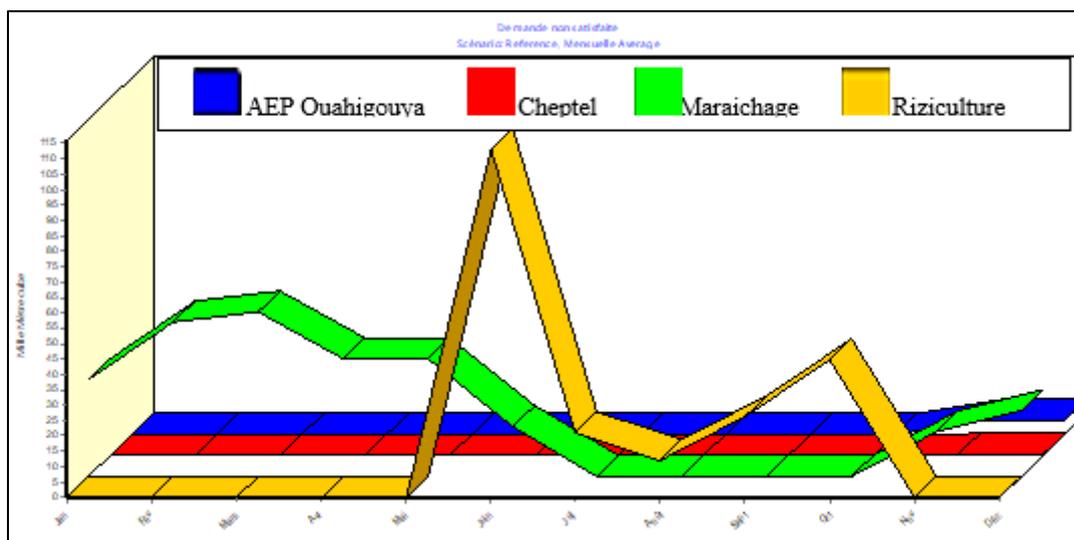


Figure 19: Niveau de couverture de la demande mensuelle sur la période (2016-2050)

1.12.4. Niveau de satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Tougou

Le barrage de Tougou est à vocation agropastorale. Les besoins agricoles des 40 ha « toutes spéculations confondues » s'élèvent à 0,65 millions de m³ contre 0,44 millions de m³ par an pour le cheptel.

La simulation de la satisfaction de la demande en eau actuelle montre que la ressource disponible assure la totalité de la demande en eau au niveau du barrage de Tougou (Figure 20).

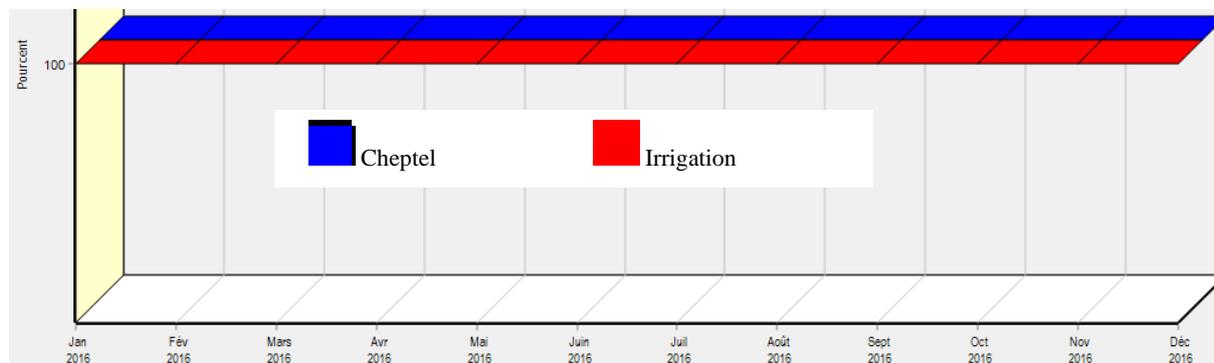


Figure 20: Couverture de la demande en eau au barrage de Tougou dans l'année de base (2016)

Dans la situation de référence « 2016-2050 », il ressort que la demande en eau est satisfaite avec les ressources disponibles jusqu'en 2027. Au-delà de 2027, ces ressources ne seront plus à même de satisfaire l'ensemble de la demande en eau. A partir de 2027 le manque à combler est de 230 mille m³ par an pour le secteur agricole et 150 mille m³ par an pour le secteur de l'élevage (Figure 21)

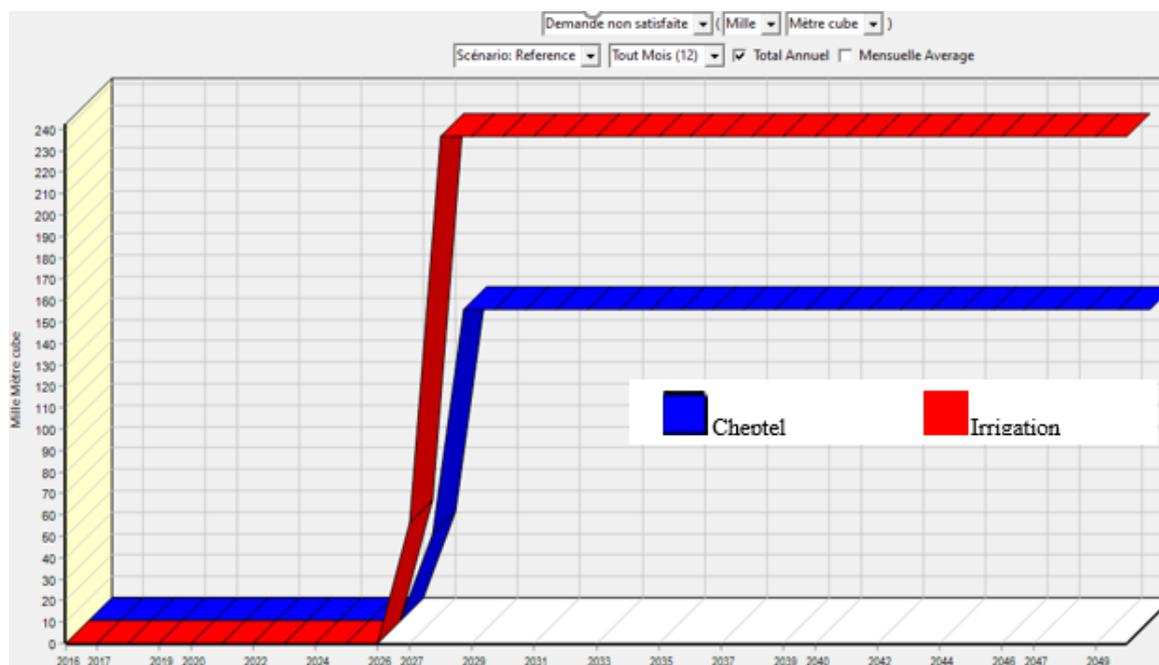


Figure 21: satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Tougou

1.12.5. Niveau de satisfaction de la demande en eau au barrage de Titao

Le même constat est fait au niveau du barrage de Titao. La demande est satisfaite pour l'année de base et ce jusqu'en 2027. Au-delà de 2027, les ressources disponibles ne pourront plus satisfaire la demande en eau au niveau de ce barrage (Figure 22).

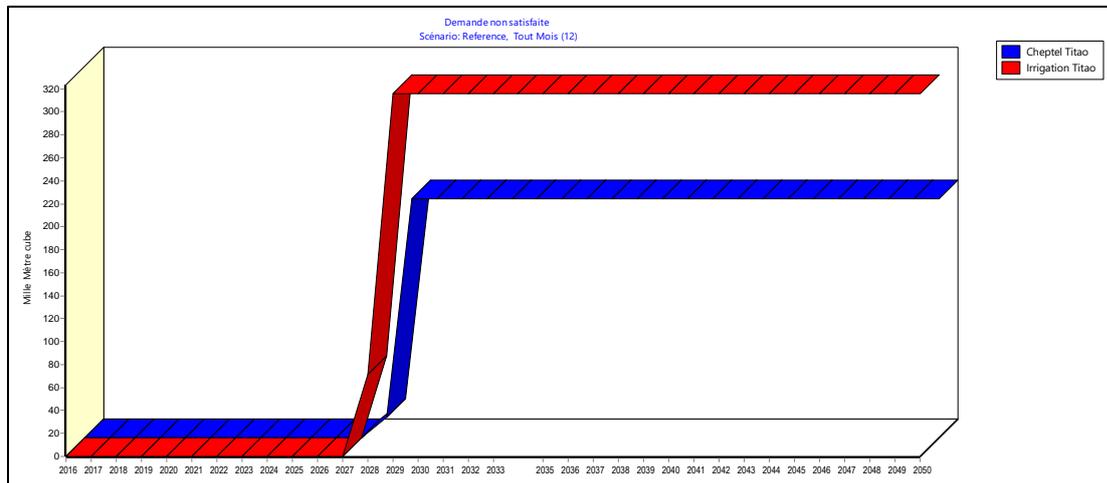


Figure 22: Satisfaction de la demande en eau des usagers du barrage de Titao

1.12.6. Niveau de satisfaction de la demande en eau au barrage de Séguénéga

La demande en eau au niveau du barrage de Séguénéga est couverte à 100% pour le compte courant et la situation de référence jusqu'en 2050 (Figure 23)

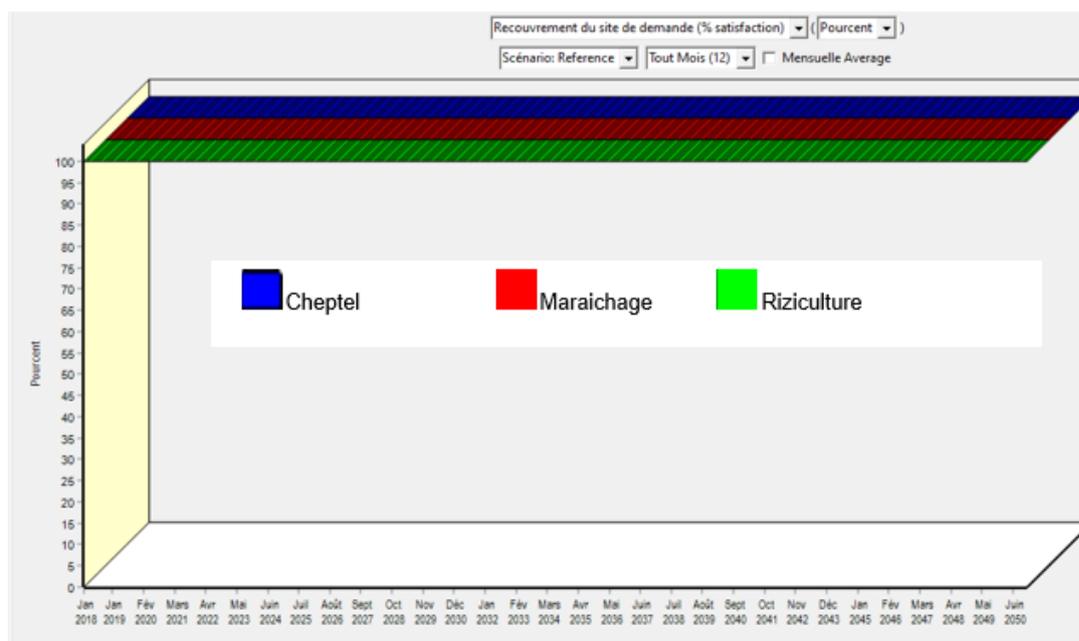


Figure 23: Satisfaction de la demande en eau au barrage de Séguénéga

1.13. Ressources en eau suivant les différents scénarios

1.13.1. Scénario d'augmentation du nombre d'abonné au réseau de l'ONEA de Ouahigouya

Comme décrit plus haut, ce scénario suppose une augmentation de la production d'eau de 5% et du taux d'accroissement du nombre d'abonnés de 20% par rapport à la situation de référence. La projection de la demande en eau à l'horizon 2050 suivant ces hypothèses, fait ressortir qu'avant 2027, les ressources en eau disponibles pourront supporter la demande en eau. Par contre à partir de 2027, les analyses indiquent des risques que le barrage de Goinré et l'ensemble des forages actuellement exploitées ne permettent plus de couvrir les besoins en eau des usagers. Les déficits de couverture vont de 0,4 million de m³ en 2027 à 6,4 millions de m³ en 2050 (Figure 24), d'où la justesse de l'idée du projet de transfert d'eau à partir du barrage de Guitti.

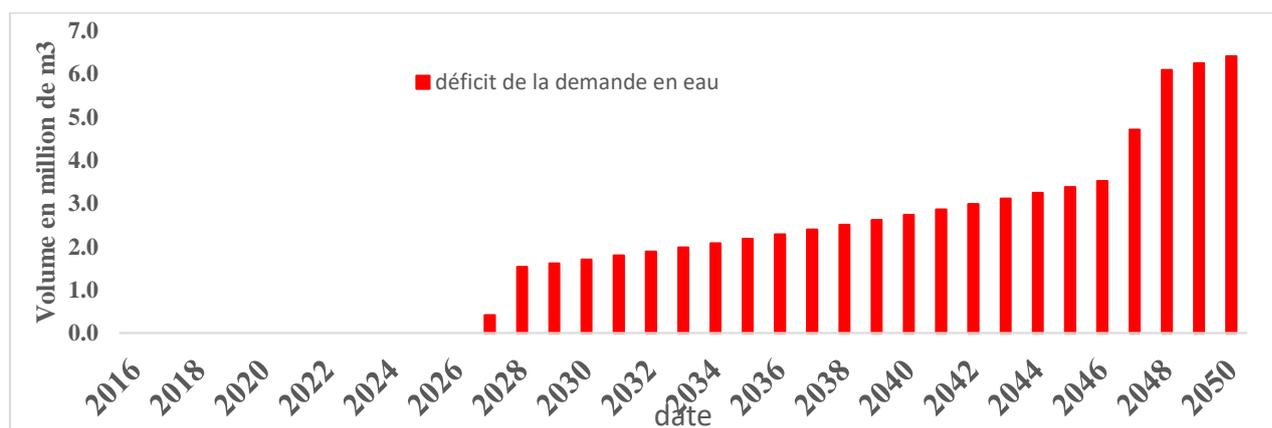


Figure 24: demande en eau potable de Ouahigouya non satisfaite sous l'effet la croissance démographique

1.13.2. Scénarios d'exploitation du barrage de Guitti pour l'AEP

L'analyse du scénario de forte démographie a révélé des difficultés de couverture des besoins en eau potable de la ville de Ouahigouya au-delà de l'année 2027. On suppose l'effectivité du projet d'AEP de la ville de Ouahigouya à partir du barrage de Guitti à partir de l'année 2022 (Conformément aux prévisions de 2019 du Ministère en charge de l'eau). Il s'agira d'évaluer l'impact de ce projet, en association avec les sources d'eau actuelles, sur le niveau de satisfaction des besoins en eau à l'horizon 2050 sous l'influence de l'augmentation de la population et du changement climatique.

Les résultats des analyses (Figure 25) montrent qu'à l'exception de la production rizicole dont les besoins en eau ne sont pas totalement couverts jusqu'en 2030 au niveau du barrage de Goinré, les autres besoins en eau sont pratiquement satisfaits. C'est à partir de 2048 que le déficit en eau pour la production en eau potable se fera ressentir. Ce déficit sera beaucoup plus ressenti durant les mois de mars-avril pour la production agricole et sur tout le cycle de développement du riz. Ce constat au niveau du riz peut s'expliquer par le fait que les prélèvements pour la production rizicole se fait directement à partir du lit aval du cours d'eau. un déficit d'écoulement ou le non déversement du barrage de Goinré entraine systématiquement un déversement au niveau du barrage de Goinré.

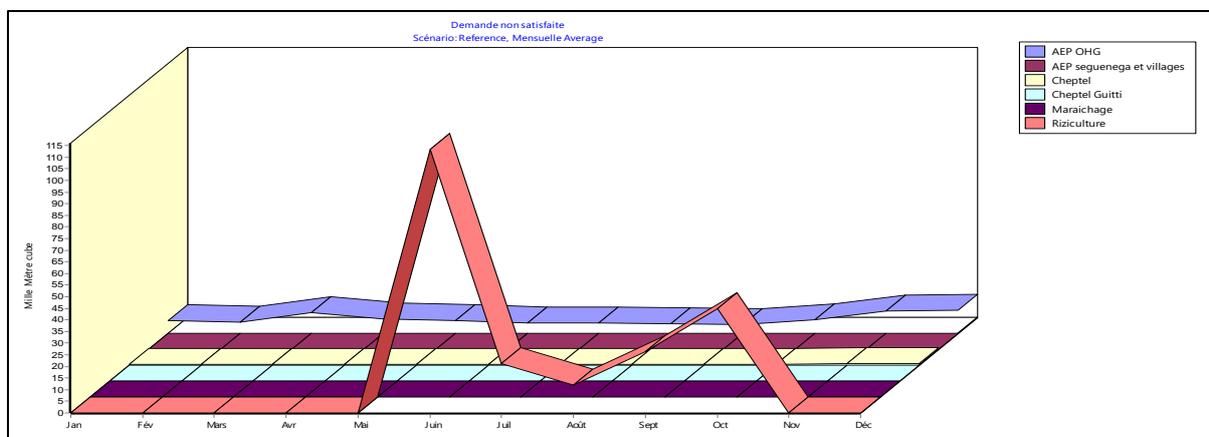


Figure 25: Niveau de satisfaction de la demande en eau "association Guitti et Goinré"

En utilisant exclusivement les ressources en eau du barrage de Guitti pour l'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya et Séguénéga, seule la production rizicole n'est pas satisfaite à l'horizon 2030. Les autres besoins sont couverts à 100% (Figure 26)

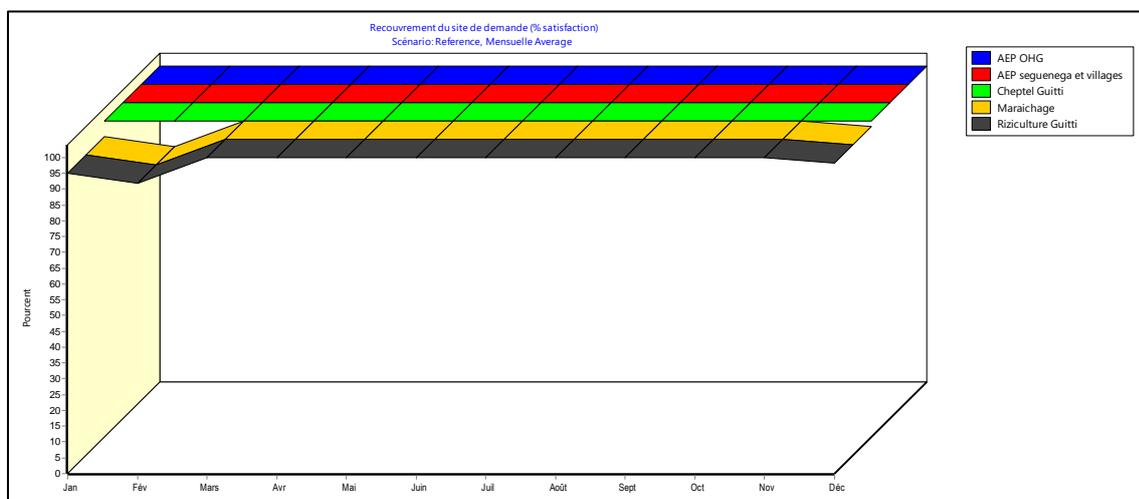


Figure 26: Couverture en de la demande à partir du Barrage de Guitti

1.13.3. Scénario d'aménagement de 450 ha en aval du barrage de Guitti

Ce scénario suppose l'aménagement effectif des terres agricoles (300 ha de riz et les 150 ha de production maraichère) prévues dans l'étude d'Avant-Projet Détaillé du barrage de Guitti et évalue son impact sur le niveau de couverture des besoins en eau des différents usagers à l'horizon 2050.

Les analyses montrent que les besoins en eau pour le cheptel et l'AEP sont complètement couverts. Cependant les besoins en eau pour les 300 ha de riz et les 150 ha de production maraichère ne pourront pas être satisfaits. Les déficits varient entre 0,25 millions de m³ en 2042 à 3 millions de m³ en 2050 (Figure 27).

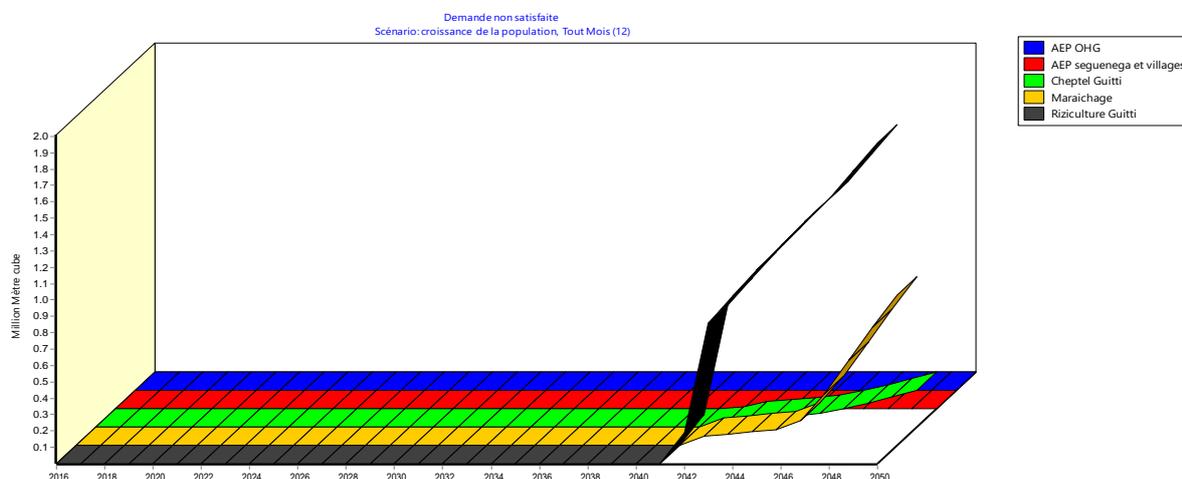


Figure 27: satisfaction de la demande en eau en prenant en compte la production agricole

1.13.4. Scénarios d'augmentation des périmètres irrigués au barrage de Guitti

L'augmentation des superficies irriguées au niveau du barrage de Guitti a un impact sur la satisfaction de la demande en eau pour l'ensemble des usagers. Pour une augmentation de 10% et 20% des périmètres irrigués au niveau du barrage de Guitti, la demande en eau est toujours couverte.

Mais à partir de 40% d'augmentation des périmètres irriguées, les besoins en eau pour l'agriculture et le cheptel ne pourront plus être couverts au-delà de 2042 (Figure 28).

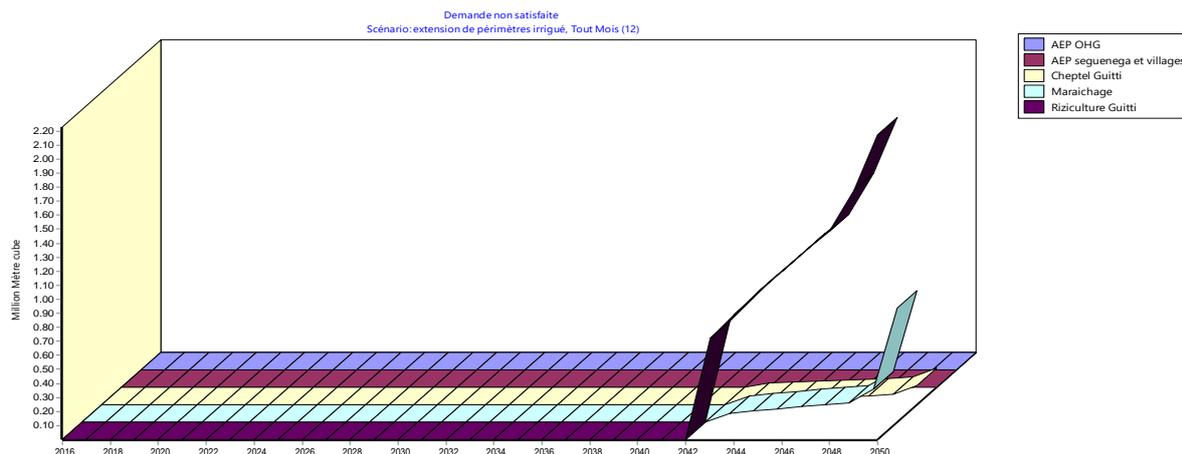


Figure 28: niveau de satisfaction de la demande en eau avec une augmentation de 40% des périmètres irrigués

1.13.5. Prise en compte de l'effet des changements climatiques

Pour ce scénario, nous nous intéresserons à l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau sur le barrage de Guitti. Les projections sur la disponibilité des ressources en eau faites à partir du scénario RCP8.5 (le plus pessimiste) fait ressortir un déficit de l'offre par rapport à la demande à partir des années 2045. Le secteur agricole surtout la production rizicole sera beaucoup touchée (0.2 à 0.4 millions de m³ pour les cultures maraichères, et entre 0.45 à 0,75 millions de m³ pour le riz) (Figure 29). En effet, la production rizicole tire en grande partie les ressources en eau à partir du déversement du barrage de Guitti. Le remplissage du barrage et son déversement étant tributaires de la pluviométrie de la zone, le déficit constaté au mois d'octobre et novembre au niveau de la production rizicole pourrait se justifier par la fin de la saison des pluies. En termes d'offre, comparé à la situation de référence, le scénario RCP8.5 enregistre un déficit de 10 000 m³ à 200 000 m³.

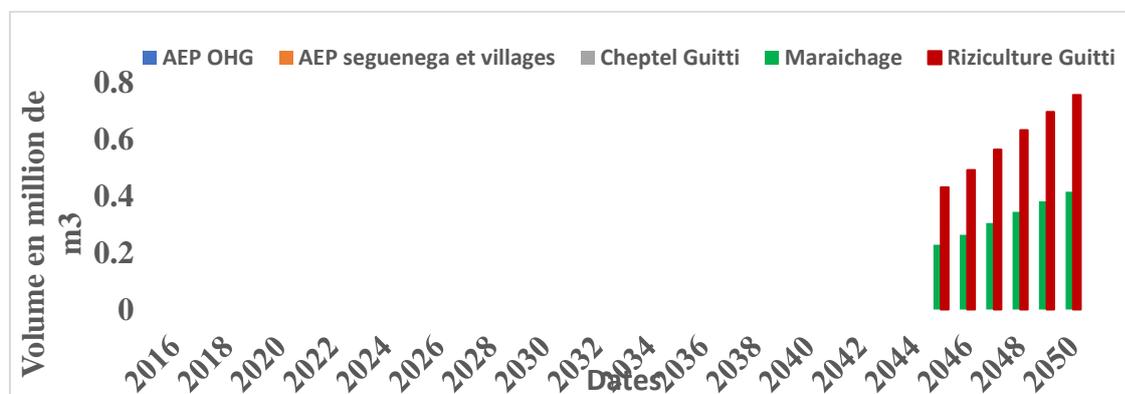


Figure 29: Impact du scénario RCP8.5 sur les ressources en eau

Comme le scénario RCP8.5, le RCP4.5 affecte également la disponibilité des ressources pour la satisfaction des différents besoins sauf que son effet est moins atténué par rapport au premier. Le déficit commence à se faire ressentir également à partir des années 2045 avec un déficit allant de 22 milles m³ à 40 milles m³ pour la production maraichère et de 40 milles m³ à 70 milles m³ pour la production rizicole (Figure 30). Comparativement à la situation de référence, le scénario RCP4.5 accuse un déficit de 4 000 à 46 000 m³ sur l'offre en eau.

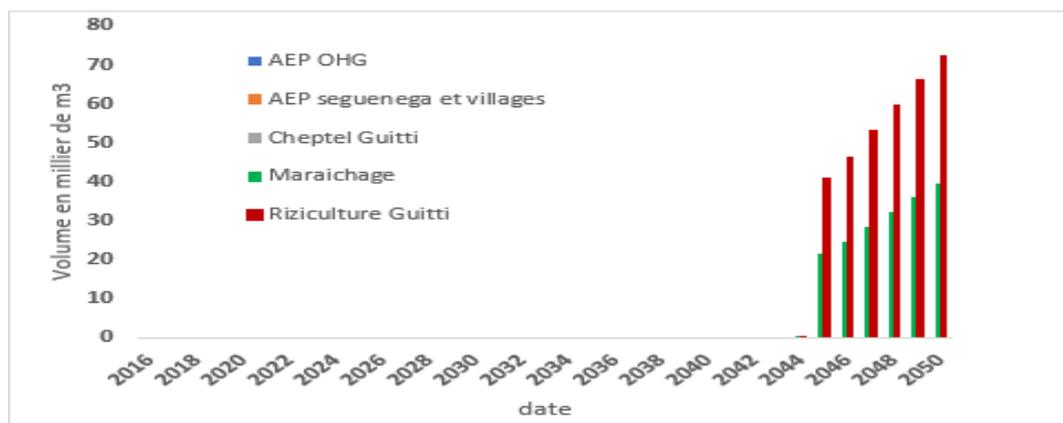


Figure 30: Impact du scénario RCP4.5 sur les ressources en eau

1.13.6. Recours aux techniques agricoles innovantes

Le recours aux techniques agricoles innovantes (Irrigation goutte à goutte) dans les périmètres irrigués de Guitti, permet recouvrir à 100% les besoins en eau à l'horizon 2047. Au-delà de cet horizon, seuls les besoins en eau destinés à la consommation humaine et animale sont satisfaits. Les besoins agricoles sont satisfaits à 95% pour la période décembre à mars et à 100 % pour les autres mois (). Bien qu'elles soient plus couteuses en entretien et moins acceptées par les producteurs, elles offrent une garantie plus large que l'irrigation goutte à goutte.

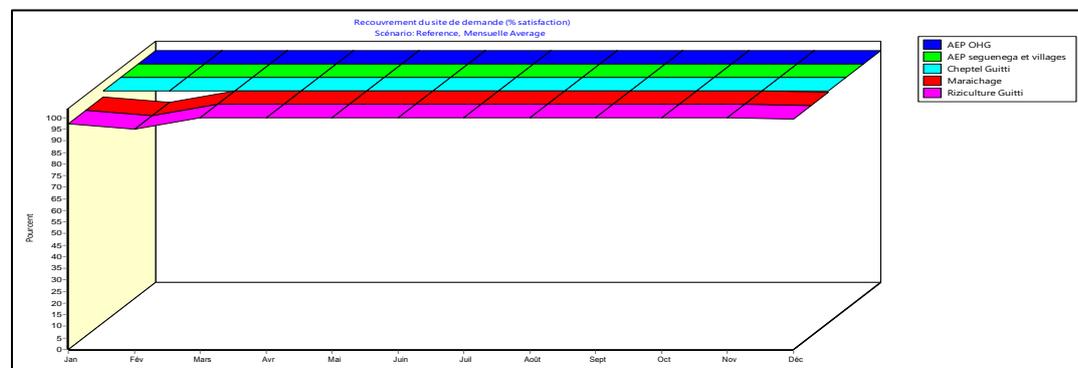


Figure 31: Impact des techniques agricoles innovantes sur la disponibilité des ressources en eau

2. Discussions

Les tests (Pettit, LEE et de HEGHINIAN, HUBERT) statistiques appliqués aux cumuls pluviométriques des différentes stations du bassin supérieur du Nakanbé font ressortir une rupture localisée en 2006 pour cinq stations pluviométriques (Ouahigouya, Baraboulé, Bourzanga, Kiembara et Pobé-Mengao) et en 1991 pour la station de Gourcy. Cette rupture est caractérisée par une hausse de la pluviométrie sur l'ensemble des stations à partir de la date de rupture. Les résultats de ces travaux qui montrent une hausse générale des précipitations dans le bassin corroborent avec les résultats d'une étude menée par (Kabore et al., 2015). En effet, pour cette étude les précipitations annuelles ont évolué à la hausse sur la période 1980-2015 dans la zone sahelienne de 37%. Contrairement aux résultats d'une étude menée sur le bassin du Nakanbé à Wayen, les pluies du bassin suivent la tendance régionale marquée par une diminution abrupte des taux annuels à partir des années 70 (Mahe et al., 2010). Cette étude montre une reprise de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant.

Les retenues d'eau du bassin sont confrontées aux problèmes de sédimentation et de la forte évaporation. Les retenues d'eau perdront environ 30% de leurs capacités à l'horizon 2050. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Razanamahandry (2013) qui projettent un comblement de 50% de la retenue d'eau de KIERMA, à l'horizon 2040 et de ceux de la PADI (2014) qui estiment le taux d'envasement de 40% sur le barrage de Mogtédou sur une durée de 40 ans. Quant aux pertes par évaporation, déjà estimés à 70% de la capacité totale des retenues, vont connaître une augmentation sous l'effet du changement climatique car l'évaporation des plans d'eau sont fonction de la hausse des températures (MERH, 2015). L'augmentation de la température affectera négativement les activités socio-économiques

L'application du modèle GeoSFM au bassin supérieur du Nakanbé a donné des résultats satisfaisants avec de bonnes valeurs des critères de performance (Nash = 0.79, coefficient de corrélation = 0.89, erreur quadratique moyenne = 3.99 et biais = 0.07). Toutefois, le débit moyen simulé sur la période 1987-1997 était de 4,96 m³/s contre 3.50 m³/s pour les débits observés, soit un écart positif de 1.46 m³/s.

Cependant, le modèle sous-estime en moyenne les écoulements du bassin. Cela pourrait s'expliquer par la qualité des données pluviométriques, principale donnée d'entrée du modèle.

On constate aussi que le modèle surestime les écoulements en période d'étiage et en début de saison pluvieuse. Cela pourrait s'expliquer par la présence des ouvrages hydrauliques en amont.

L'application du modèle WEAP au bassin supérieur du Nakanbé montre une adéquation entre l'offre et la demande pour l'année de référence « 2016 ». En effet, appliqué à l'année 2016, la quasi-totalité de la demande en eau est satisfaite sur l'ensemble des cinq retenues d'eau. Appliqué sur la période de référence « 2017-2050 », et sous l'effet de la croissance démographique, les ressources disponibles ne pourront plus supporter la demande. Le problème d'eau se fait déjà ressentir dans la ville de Ouahigouya, et cela est la conséquence de plusieurs facteurs. La région du Nord et particulièrement la ville de Ouahigouya se situe en zone de socle avec des aquifères peu productifs, et la zone est connue pour le problème d'arsenic qui affecte la nappe phréatique. La solution pourra venir du raccordement au barrage de Guitti tout en mettant l'accent sur une gestion rationnelle des ressources en eau.

Conclusion et recommandations

Les ressources en eau du bassin supérieur du Nakanbé sont soumises à la pression des activités anthropiques et aux effets des changements climatiques. Les ressources en eau disponibles notamment dans le barrage de Guitti pour satisfaire la demande des différents usagers s'amenuisent au fil des années. Dans l'optique de mieux cerner le problème d'eau dans le bassin, des outils d'aide à la décision tels que WEAP et GEOSFM ont été utilisés.

Le calage et la validation du modèle GeoSFM sur le bassin supérieur du Nakanbé nous a permis de simuler les régimes d'écoulements du Nakanbé supérieur et de ses affluents au moyen des données de pluie et d'ETP journalières pour enfin les utiliser comme données d'entrées dans le modèle WEAP.

L'analyse des tendances climatiques sur la période 1980-2018 montre une modification du régime pluviométrique dans le bassin supérieur du Nakanbé caractérisée par une rupture en 2006. Cette rupture se manifeste par une tendance à la hausse des précipitations à partir de 2006 pour cinq stations pluviométriques du bassin.

Les résultats de la modélisation de l'offre et de la demande en eau dans le bassin supérieur du Nakanbé à l'aide du modèle WAEP nous ont permis de mettre en évidence la problématique de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin et plus particulièrement autour des ouvrages de mobilisation des ressources en eau de surface. Dans l'état actuel, les ressources en eau disponibles couvrent presque les besoins en eau. La disponibilité des ressources autour des ouvrages de mobilisation des ressources en eau concernés par la présente étude se fera ressentir d'ici 2030 à l'exception du barrage de Guitti. Les scénarios d'adaptation envisagés permettent à peine d'atteindre un équilibre entre l'offre et la demande à l'horizon 2050.

L'une des options pour la pérennisation des ressources dans le bassin est la mise en œuvre effective de la gestion intégrée des ressources en eau. Pour ce faire nous formulons les recommandations suivantes :

- A l'endroit de l'Agence de l'Eau du Nakanbé :
 - La mise en place d'une zone de servitudes autour des différents ouvrages du bassin particulièrement autour du barrage de Guitti afin de limiter l'exploitation des cuvettes d'eau à des fins agricoles ;
 - Le reboisement ou l'aménagement des cordons pierreux au-dessus des zones de servitude afin de réduire le phénomène d'envasement dans les retenues d'eau ;

- La mise en place d'un Comité Local de l'Eau au barrage de Guitti dont la mission principale sera la protection de l'ouvrage et la gestion de l'allocation des ressources en eau du barrage de Guitti par l'application des textes et des règlements en vigueur ;
 - L'implication des femmes dans la gestion des ressources en eau. Les arrangements institutionnels relatifs à la mise en valeur et à la gestion des ressources en eau tiennent rarement compte du rôle primordial des femmes comme utilisatrices d'eau et gardiennes du milieu vivant. Pourtant elles sont au centre de l'approvisionnement, de la gestion et la préservation de l'eau. Leurs implications à la gestion des ressources en eau contribueront à réduire significativement le gaspillage de la ressource en eau.
- A la Direction en charge de l'hydrologie :
- De renforcer le suivi hydrologique et piézométrique par l'installation des équipements hydrologiques modernes afin de mieux maîtriser la disponibilité de la ressource dans le bassin d'une part et d'autre part collecter les informations nécessaires pour l'allocation des ressources en eau ;
 - Mettre en place un système de communication pour permettre à l'ensemble des usagers de l'eau d'avoir les informations sur la disponibilité des ressources en eau en temps réel ;
 - Elaborer et mettre à la disposition des usagers et des autorités locales des outils d'aide à la décision.
- A l'office National de l'Eau et de l'Assainissement :
- D'opérationnaliser la seconde phase du projet d'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya à partir du barrage de Guitti par l'installation de la station de traitement de 400m³/h, des conduites d'adduction, du château d'eau, de la ligne électrique et des conduites de distributions.

Bibliographie

- AFOUDA, A., AGUE, A.I., LANHOUSSE, F., 2015. Etude comparative d'un modèle conceptuel global (GR4J) et d'un modèle semi-distribué (GEOSFM) sur le bassin versant de l'Ouémé à Savè (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Revue LJEE*.
- Ali, A., Lebel, T., 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 29, 1705–1714.
- Ardoin, S., LUBES-NIEL, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J.-F., 2003. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'ouest: caractérisation de la situation, in: *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions: Papers Selected for the International Conference on Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions, Held in Montpellier, France from 1 to 4 April 2003*. International Assn of Hydrological Sciences, p. 223.
- Ardoin-Bardin, S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (PhD Thesis).
- Asante, K.O., Artan, G.A., Pervez, S., Bandaragoda, C., Verdin, J.P., 2008. Technical Manual for the Geospatial Stream Flow Model(GeoSFM). U. S. Geological Survey.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., 2008. Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.
- BERGAOUI, M., Alouini, A.W.S., 2002. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 12, 205–13.
- Bi, T., Armand, Z., 2013. Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (MAROC). (PhD Thesis). Artois.
- BRUNEAU, P., CLAUDE, J.-C., 1983. Application d'un modèle bayésien de détection de changements de moyennes dans une série. *Hydrological sciences journal* 28, 341–354.
- Carbonnel, J.-P., Hubert, P., 1985. Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute-Volta). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 301, 941–944.
- Coalition eau, 2014. Eau et changement climatique. Montreuil, France.
- DGESS/MEA, M. de l'eau de l'Assainissement, 2018. Annuaire statistique de l'eau et de l'assainissement 2016. Ministère de l'eau et de l'Assainissement, Ouagadougou.
- DGIH, M., 2019. Rapport bilan des activités de mise en oeuvre du Programme National d'aménagements hydrauliques. Ministère de l'Eau et de l'Assainissement, Ouagadougou.
- DGIH/MEA, 2018. Rapport bilan des activités de mise en oeuvre du Programme National d'aménagements hydrauliques. Ministère de l'Eau et de l'Assainissement, Ouagadougou.
- Ebi, K.L., Hallegatte, S., Kram, T., Arnell, N.W., Carter, T.R., Edmonds, J., Kriegler, E., Mathur, R., O'Neill, B.C., Riahi, K., 2014. A new scenario framework for climate change research: background, process, and future directions. *Climatic Change* 122, 363–372.
- Eldin, M., 1971. Le climat. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire 73–108.

- Fritsch, J.-M., Servat, E., 1998. Conditions de l'amélioration de la connaissance des ressources et des usages de l'eau pour la gestion durable dans un contexte de rareté croissante. IAHS PUBLICATION 395–410.
- Guivarch, C., Rozenberg, J., 2013. Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique.
- Hiez, G., 1986. Bases théoriques du " vecteur régional". Les premières applications et leur mise en œuvre informatique. Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM 1–35.
- Hiez, G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie 14, 29–173.
- HOTTIN, G., OUEDRAOGO, O.F., 1975. Notice explicative de la carte géologique à 1: 1 000 000 de la république de Haute-Volta. Editions du BRGM.
- Hubert, P., Carbonnel, J.-P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. Journal of hydrology 95, 165–183.
- Kabore, P.N., Ouedraogo, A., Sanon, M., Yaka, P., Some, L., 2015. Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. Climatologie.
- Koussoubé, Y., 1996. Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso: Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga).
- Lamarque, P., Jourdain, S., 1994. Elaboration de longues séries climatologiques homogènes pour l'étude de l'évolution climatique. La météorologie.
- Léger, J.-F., 2016. Climat et dynamique démographique. Population Avenir 4–7.
- Lubes-Niel, H., Masson, J., Paturel, J., Servat, E., 1998. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science 11, 383–408.
- Mahe, G., Diello, P., Paturel, J.-E., Barbier, B., Karambiri, H., Dezetter, A., Dieulin, C., Rouche, N., 2010. Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel: impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. Sécheresse 21, 330–332.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., 1995. Utilisation de la méthode du vecteur régional pour la description des variations pluviométriques interannuelles en Afrique de l'ouest et centrale.
- MAHRH, 2010. Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement à l'horizon 2015 PN-AEPA 2015 28.
- MAHRH, 2005. Investigations hydrologiques pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya. Ouagadougou.
- Marchal, J.-Y., 1983. Volume I: Yatenga Nord Haute-Volta: La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Volume II: 28 cartes. Travaux et documents de l'ORSTOM.
- Martin, J.-C., 2010. Impacts économiques d'une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la région Aquitaine (PhD Thesis). Bordeaux 4.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, pp. 179–183.
- MEA, 2006. Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau 2016-2030, Ouagadougou, Burkina Faso.
- MEE, 2001. Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion.
- Meyer, L.A., PACHAURI, R., 2014. Changements climatiques 2014: rapport de synthèse: contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; GIEC. OCLC.

- Mondon, S., Imbard, M., 2013. Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC. Observation national sur les effets du réchauffement climatique" ONERC.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Murphy, J.M., Sexton, D.M., Barnett, D.N., Jones, G.S., Webb, M.J., Collins, M., Stainforth, D.A., 2004. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* 430, 768–772.
- Nash, J.E., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 398–409.
- Niasse, M., 2000. Assurer la coordination de la gouvernance des terres et de l'eau pour la sécurité alimentaire et l'égalité des genres 80.
- OUEDRAOGO, I., 1994. Géologie et hydrogéologie des formations sédimentaires de la boucle du Mouhoun (Burkina Faso). Doctorat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar.
- Paturel, J.-E., Servat, E., KOUAME, Jb., Travaglio, M., Lubes, H., Marieu, B., MASSON, J.-M., 1998. Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 28, 126–135.
- Remund, J., von Arx, G., Gallien, L., Rebetez, M., Huber, B., ZIMV MERMANN, N., 2016. Changements climatiques en Suisse—définition de paramètres climatiques relatifs à la forêt. PLUESS, AR; AUGUSTIN, S.; BRANG, P.(Réd.), Forêts et changements climatiques. Éléments pour des stratégies d'adaptation. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne 23–39.
- RIVER, I.M., 2006. Evaluating land use change effects on river flow using USGS geospatial stream flow model in Mara River basin, Kenya. *Center for Remote Sensing of Land Surfaces* 28, 30.
- Soro, T.D., Soro, N., Oga, Y.M.-S., Lasm, T., Soro, G., Ahoussi, K.E., Biémi, J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement* 55–73.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Pangalou, D., Tigkas, D., Vangelis, H., 2008. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI), in: *Proceedings of the 1st International Conference "Drought Management: Scientific and Technological Innovations"*. Zaragoza, Spain: Option Méditerranéennes, Series A. p. 2008.
- Velluet, C., 2014. Modélisation et analyse pluriannuelles du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral (Sud-Ouest Niger) (PhD Thesis).
- Vissin, E., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger (PhD Thesis).
- Yates, D., Averyt, K., Flores-Lopez, F., Meldrum, J., Sattler, S., Sieber, J., Young, C., 2013. A water resources model to explore the implications of energy alternatives in the southwestern US. *Environmental Research Letters* 8, 045004.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., 2005. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International* 30, 487–500.

Annexe

Annexe1 : Quatre grandes familles de scénarios climatiques proposées par GIEC en 2000

	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Mondialisation	A1 : Croissance économique plus rapide composé de trois groupes : A1T, A1B, A1FI Avec une augmentation probable de la température entre 1.4 et 6.4°C	B1 : Durabilité environnementale globale avec une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre entre 1.1 et 2.9°C
Régionalisation	A2 : Développement économique avec une orientation régionale. Où on prévoit une augmentation probable de la température globale moyenne à la surface de la terre comprise entre 2.0 et 5.4°C	B2 : Durabilité environnementale locale avec une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre entre 1.4-3.8°C

Annexe 2 : Caractéristiques principales des RCP

Nom	Forçage radiatif	Concentration des GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8 Wm ⁻² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissance
RCP 6.0	~ 6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~ 850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~ 3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Annexe 3 : Test de PETTITT

Le test de (Pettitt, 1979) est réputé pour sa robustesse. C'est un test non-paramétrique et dérivé de la formule du test de Mann-Whitney. Dans ce test l'hypothèse nulle (h_0) est caractérisée par l'absence d'une rupture dans la série chronologique des données de la station. La variable

$$(U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & ; \text{si } x < 0 \\ 0 & ; \text{si } x = 0 \\ 1 & ; \text{si } x > 0 \end{cases}) \text{ défini par Pettitt}$$

propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N , définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$. À partir de la théorie des rangs, il montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par $\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^3 + N^2}\right)$.

En considérant un risque δ de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à δ , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé $\max|U_{t,N}|_{t=1,N-1}$ (Pettitt, 1979).

Annexe 4 : Pluviométrie annuelle des stations pluviométriques du bassin versant

Date	Pobe mengao	Ouahigouya	Kiembara	Gourcy	Bourzanga	Baraboulé
1980	387.1	576.1	536.5	Lacune	436.8	442.3
1981	445.6	836.1	554.9	538.4	558.8	Lacune
1982	350.3	360.1	585	460.7	370.2	367
1983	425.4	358.2	512.2	427	479	327.1
1984	203.6	391	588.1	Lacune	342.7	209.8
1985	336.9	420.3	520.8	606.9	408	236.5
1986	329.8	590.5	590.7	592.8	423.2	409.3
1987	Lacune	466.4	450.6	451.7	382.3	274.5
1988	552	707.1	742.1	628.6	553.9	383.3
1989	364.5	612	606.9	700.4	481.8	353.5
1990	225.9	403.1	464.2	Lacune	486.4	213.4
1991	491.8	679.5	606.9	581.1	557.5	466.5
1992	442.7	713.5	Lacune	Lacune	655.6	487.3
1993	454.6	589.7	549.3	667.2	440.1	423.7
1994	673.6	932	994.2	Lacune	741.5	708.3
1995	484.1	613.2	587.7	634.9	446.2	409.1
1996	242.3	733.1	681.2	612.8	547	444.1
1997	571.9	590.9	659.9	530.2	375.7	520.7
1998	555.2	650.3	691.4	842.4	582.5	653.1
1999	397.6	672.5	727.8	671.7	605.1	591.5
2000	492.6	577.8	636.4	541.7	452.2	414.2
2001	412.6	733.9	592.4	643.4	534.5	425.1
2002	351.4	543.6	494.5	594	425.3	340.9
2003	616.6	729.8	798.2	799.9	626.5	724.2
2004	263.2	589.5	670	538.7	419.9	445.6
2005	524.5	575.1	603.2	712.9	394.1	495
2006	373.1	647.5	544.1	613.8	551.6	439.1
2007	485.6	983.4	816.4	742.8	576.5	594.1
2008	274.6	759.3	709	876.6	640.8	467.8
2009	531.5	767.6	802.2	703.1	516.7	427.8
2010	507.4	898.7	702.4	1016	614.1	559
2011	252.7	505.3	Lacune	601.1	355.7	354.6
2012	463.5	963.6	884.5	Lacune	588.6	581.9
2013	340.9	712.6	765.2	Lacune	510.2	488.7
2014	461.1	766.6	690.5	907.4	549	595.8
2015	Lacune	915.3	709.1	850.5	529	582.3
2016	Lacune	920.8	617	704.1	605.7	389.3
2017	600.2	891.1	620.2	812.2	584.5	Lacune
2018	579.8	929.5	776.2	1007.6	637.6	590.9

Annexe 5 : Correction des données pluviométrique de la station de Gourcy par la MVR

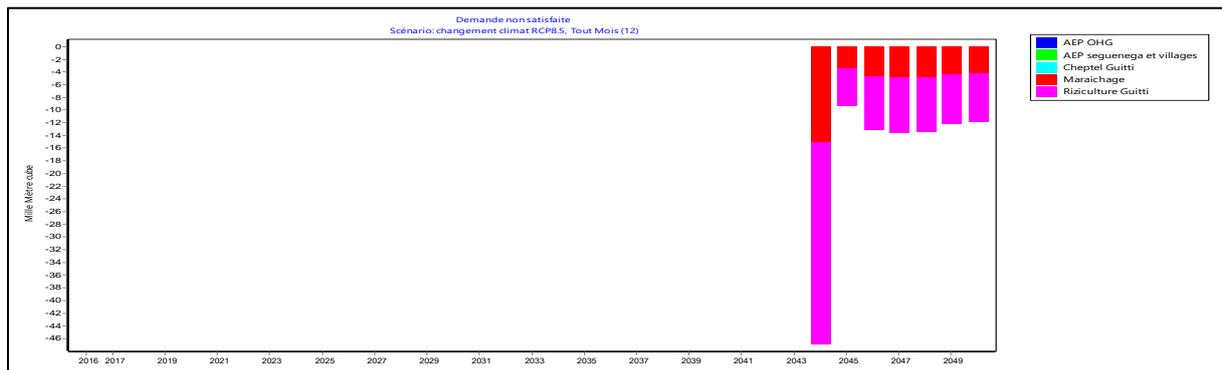
Année	Ecart/Vecteur	Vecteur	Cumul Vecteur	Cumul Station	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
1980		0.871	0.87			599.7	645.2
1981	-0.26	1.038	1.91	1.65	538.4	714.7	834.7
1982	-0.1	0.771	2.68	2.32	460.7	530.9	656.6
1983	-0.14	0.762	3.44	2.94	427	524.7	491.9
1984		0.615	4.06			423.4	384.2
1985	0.12	0.765	4.82	4.44	606.9	526.7	525.2
1986	0.01	0.849	5.67	5.3	592.8	584.6	728.1
1987	-0.02	0.675	6.35	5.96	451.7	464.8	390.6
1988	-0.17	1.079	7.42	6.87	628.6	742.9	688.7
1989	0.12	0.897	8.32	7.89	700.4	617.6	612.2
1990		0.622	8.94			428.3	511.5
1991	-0.15	0.998	9.94	9.35	581.1	687.2	650.2
1992		1.093	11.03			752.6	828.3
1993	0.05	0.914	11.95	11.41	667.2	629.3	589
1994		1.481	13.43			1019.7	948.6
1995	-0.01	0.93	14.36	13.82	634.9	640.3	663.4
1996	-0.1	0.995	15.35	14.71	612.8	685.1	857.9
1997	-0.21	0.984	16.34	15.48	530.2	677.5	598.2
1998	0.05	1.174	17.51	16.7	842.4	808.3	866.9
1999	-0.1	1.074	18.59	17.68	671.7	739.5	862.4
2000	-0.13	0.919	19.5	18.46	541.7	632.8	649
2001	-0.04	0.97	20.48	19.4	643.4	667.9	490.1
2002	0.06	0.798	21.27	20.26	594	549.4	569.9
2003	-0.11	1.274	22.55	21.42	799.9	877.2	891.4
2004	-0.1	0.883	23.43	22.2	538.7	608	564
2005	0.03	1.006	24.44	23.24	712.9	692.7	647.4
2006	-0.03	0.925	25.36	24.13	613.8	636.9	684
2007	-0.14	1.215	26.58	25.21	742.8	836.6	787.1
2008	0.14	1.132	27.71	26.48	876.6	779.4	684.6
2009	-0.07	1.088	28.8	27.5	703.1	749.1	863.4
2010	0.24	1.239	30.04	28.98	1016	853.1	747.9
2011	0.12	0.758	30.79	29.85	601.1	521.9	566.9
2012		1.247	32.04			858.6	785.4
2013		1.056	33.1			727.1	636.8
2014	0.17	1.151	34.25	33.47	907.4	792.5	736.9
2015	0.04	1.191	35.44	34.71	850.5	820	878.6
2016	-0.04	1.06	36.5	35.73	704.1	729.8	814.2
2017	-0.01	1.192	37.69	36.91	812.2	820.7	754
2018	0.15	1.31	39	38.37	1007.6	902	903.6

Annexe 6 : Ressource en eau de surface disponible dans le bassin versant

NOM DE L'OUVRAGE	TYPE	Capacité (millier m3)	Usage
TEMNAORE	Barrage	1573	Agricole
BARABOULLLI	Barrage	2000	Agricole
IBI-KOUDRE	Barrage	15000	Agricole
KOULWEOGO	Barrage	1500	Agricole
OUI	Barrage	750	Pastoral
KOUMNA	Barrage	1400	Pastoral
TOOLO	Barrage	1350	Agricole
BABO	Barrage	1520	Pastoral
ILEGUERE	Barrage	192	Pastoral
TITAO	Barrage	5800	Agricole
SILLIA	Barrage	424	Agricole
DINGUILA	Barrage	2000	Pastoral
OUATINOMA-SILMIMOSSE	Barrage	7500	Agricole
BARELEGUE	Barrage	12.6	Pastoral
NAMISSIGUIMA	Barrage	950	Pastoral
TOUGOU	Barrage	4700	Agricole
AOREMA	Barrage	1040	Pastoral
BAPORE	Barrage	82.19	Agricole
SAYE	Barrage	350	Pastoral
GONDOLOGO	Barrage	160	Agricole
GOINRE	Barrage	11200	AEP
GOURGA	Barrage	600	Pastoral
OUAHIGOUYA	Barrage	3500	Agricole
SOMIANGA	Barrage	3000	Agricole
BOURBO	Barrage	900	Agricole
BOURO	Barrage	120	Pastoral
KOURBO-MOGO	Barrage	396	Pastoral
RAMBI	Barrage	12	Pastoral
TILI	Barrage	150	Pastoral
SEGUENEGA	Barrage	2740	Agricole
BOUGOUNAM	Barrage	450	Pastoral
Barrage de Guitti	Barrage	43700	AEP
MOUGOUNIG-BOULI	Bouli	35	Agricole
WINDGUE BANKA	Bouli	15	Agricole
TAO BOULI	Bouli	13	Agricole
VATO BOULI	Bouli	15	Agricole
YOBA	Bouli	25	Agricole
SAMBOULGA	Bouli	12	Agricole
BABO	Bouli	13	Agricole
DERPON	Bouli	14	Agricole
TOUGREBOULI	Bouli	30	Agricole
SOOFFEE	Bouli	35	Agricole

PETENAYE	Bouli	25	Agricole
MAGAROUYOU BIRO	Bouli	36	Agricole
SOULOU	Bouli	20	Agricole
Kononga	Bouli	45	Agricole
MOGOMBOULI	Bouli	15	Agricole
Nong-Fayir	Bouli	2	Agricole
OULLA	Bouli	16	Agricole
PELLE	Bouli	20	Agricole
YIBI(BOULI DE IBI)	Mare	1500	Agricole
SIRFOU	Mare	360	Agricole
Toulfé	Mare	350	Agricole
Séguénéga	Mare	5600	Agricole
Tanghin	Mare	250	Agricole
TEONSOGO	Mare	363	Agricole
		123880.79	

Annexe 7 : Comparaison entre le scénario RCP4.5 et la situation de référence



Annexe 8 : Comparaison entre le scénario RCP8.5 et la situation de référence

