

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

NANA B. ALEXIS

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER Professionnel en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

THEME :

**OPTIMISATION DE L'ALLOCATION DES RESSOURCES EN
EAU DANS UNE VISION PROSPECTIVE : APPLICATION DU
MODELE WEAP 21 DANS LE SOUS BASSIN VERSANT DE LA
HAUTE COMOIE AU BURKINA FASO**

Superviseur

Prof. ALAMOU Adéchina Eric

Enseignant-Chercheur à l'ENSTP/UNSTIM d'Abomey

Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Soutenu à Calavi, le vendredi 23 juin 2023

Maître de Mémoire :

Dr BIAO Iboukoun Eliézer

Enseignant-Chercheur à l'ENSGMM/UNSTIM d'Abomey

Maître-Assistant des Universités du CAMES

Maître de Stage :

OUEDRAOGO Alligouamé Vincent

Ingénieur Hydrologue en service à la DGRE (BF)

Composition du jury:

Président :

Prof. ALAMOU A. Eric

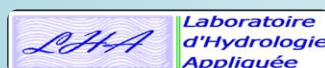
Examineurs :

Dr HOUNKPE Jean

Dr CHABI Amédée

Rapporteur :

Dr (MA) BIAO I. Eliézer



PROMOTION : 2020-2021

Dédicace

À

La mémoire de ma mère.

Et en signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce modeste travail.

À

Ma famille : cher père, mes chers frères et sœurs;

Mon épouse et ma fille qui sont ma source de motivation dans cette vie.

B. Alexis NANA

Remerciements

Je rends grâce au TOUT PUISSANT, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au succès de notre formation et à la concrétisation du présent document.

Je m'adresse particulièrement :

- au Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso, qui, à travers son Programme d'Approvisionnement en Eau et Assainissement (PAEA) nous a permis, de bénéficier de cette formation ;
- à l'Institut National de l'Eau (INE) du Bénin ainsi qu'au corps professoral pour la formation de qualité dont nous avons bénéficiée ;
- à la Direction Générale des Ressources en Eau du Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso, qui nous a accueillis pour ce stage et qui nous a fourni les données hydrométriques nécessaires à la conduite de l'étude ;

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Docteur Abdoukarim ALASSANE, Chef du Département d'Hydrologie et surtout au Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'INE qui n'ont ménagé aucun effort pour nous assurer un meilleur encadrement.

J'exprime également ma profonde gratitude au Docteur Eliézer BIAO, mon Maître de mémoire, à mon Superviseur, le Professeur Eric ALAMOU et à Monsieur Vincent OUEDRAOGO mon maître de stage pour leur encadrement et leur disponibilité malgré leurs multiples occupations ;

Je voudrais enfin exprimer ma reconnaissance à tous mes compatriotes et à mes camarades de classe pour la solidarité et les bons moments passés ensemble tout au long de cette formation.

Résumé

Au Burkina Faso, l'agriculture pluviale, confrontée aux déficits pluviométriques, couvre difficilement les besoins des populations en pleine croissance. Le souci d'assurer une sécurité alimentaire oblige ainsi les décideurs à promouvoir l'agriculture irriguée notamment de contre-saison. Le sous bassin versant de la Haute Comoé couvre une superficie de 1928 km² et abrite d'importants périmètres agricoles tels que le périmètre de la SN-SOSUCO et la plaine rizicole de Karfiguéla. En plus de ces périmètres exploités depuis plus de trente ans, d'autres types non structurés dits « informels » s'imposent de plus en plus dans le paysage du fait de la pression démographique. Ces pratiques occasionnent des pénuries d'eau en saison sèche (de février à mai). A cela s'ajoutent les besoins pour les autres usages tels que l'approvisionnement en eau potable et le cheptel.

Dans ce contexte, une approche intégrée de la gestion de l'eau s'avère nécessaire en vue d'une meilleure prise en compte de l'ensemble des secteurs utilisateurs. Le modèle WEAP21, un outil d'aide à la prise de décision pour la planification et la gestion de l'eau, a été utilisé pour simuler l'évolution de la demande et du potentiel actuel et futur à l'horizon 2050 des ressources en eau. Les valeurs des critères de performance RMSE, Nash et PBIAIS en calage et en validation sont conformes aux valeurs seuils recommandées (Nash > 50% ; PBIAIS < ±25% et RMSE > 0,7). Ces performances laissent entrevoir que le modèle a la capacité de représenter la situation actuelle et future de l'offre et de la demande en eau.

Les résultats montrent que la ressource en eau disponible est suffisante pour satisfaire les demandes de certains usagers (Cheptel et AEP urbain) dans la situation actuelle. Les problèmes liés à la disponibilité en eau pourraient se manifester dès 2030, si la tendance climatique actuelle se poursuivait et si l'on observait une extension des superficies irrigables. La demande en eau non satisfaite pourrait passer de 29 millions de m³ en 2020 à 51 millions de m³ en 2050 soit une augmentation de 75,86%. En prenant en compte les effets possibles du changement climatique et de l'accroissement des terres irrigables, l'on pourrait assister à des difficultés de satisfaction de la demande dès 2021. Le déficit en eau pourrait atteindre 54 et 59 millions de m³ en 2050 respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les mesures d'optimisation (système d'irrigation par aspersion ou goutte à goutte, etc.) proposées permettront de réduire de 10% la demande en eau sur la période 2030-2040. La réalisation de forages à gros débit pourrait contribuer à satisfaire les demandes en eau potable de la population et du cheptel malgré les effets combinés du changement climatique et de la démographie jusqu'en 2029 pour le RCP8.5 et 2039 pour le RCP4.5. Les simulations effectuées à travers les différents scénarios montrent que la satisfaction des besoins en eau pour toutes les activités sera difficile à atteindre.

Mots clés : modèle WEAP, ressource en eau, sous bassin versant Haute Comoé, mesure d'optimisation, changement climatique

Abstract

In Burkina Faso, rain-fed agriculture, faced with rainfall deficits, is no longer sufficient to feed the growing population. The concern to ensure food security is forcing decision-makers to promote irrigated agriculture, particularly in the off-season. The Upper Comoé sub-watershed covers an area of 1928 km² and contains several important agricultural areas such as the SN-SOSUCO area and the Karfiguéla rice growing area. These perimeters have been exploited for more than thirty years and have been expanding since then under demographic pressure, through the development of unstructured irrigated perimeters known as "informal" all around. These practices cause water shortages in the dry season (february to may).

In addition, there are needs for other uses such as drinking water supply and livestock. In this context, an integrated approach to water management is needed to better take into account all user sectors. The WEAP21 model, a decision support tool for water planning and management, was used to simulate the evolution of current and future water demand and water resource potential up to 2050. The values of the RMSE, Nash and PBIAIS performance criteria in calibration and validation are in line with the recommended threshold values (Nash > 50%; PBIAIS < ±25% and RMSE > 0.7). These performances suggest that the model has the capacity to represent the current and future water supply and demand situation.

The results indicate that the available water resource is sufficient to meet the demands of some users (livestock and urban water supply) in the current situation. Also, the problems related to water availability could become apparent as early as 2030, if the current climatic trend continues and if there is an expansion of the irrigable areas. Unmet water demand will increase from 29 million m³ in 2020 to 51 million m³ in 2050, i.e. an increase of 75,86%. Taking into account the possible effects of climate change and the increase in irrigable land, there could be difficulties in meeting demand as early as 2021. The water deficit could reach 54 and 59 million m³ in 2050 for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios respectively. The proposed optimization measures (sprinkler or drip irrigation systems, etc.) will reduce water demand by 10% over the period 2030-2040. The construction of boreholes could contribute to meeting the drinking water demands of the population and livestock despite the combined effects of climate change and demography until 2029 for RCP8.5 and 2039 for RCP4.5. The simulations carried out through the different scenarios will show that meeting the water needs of all activities will be difficult to achieve.

Keywords: WEAP model, water resource, Haute Comoé sub-catchment, optimization measure, climate change

Sigles et abréviations

AEC	:	Agence de l'Eau des Cascades
AEP	:	Adduction d'Eau Potable
AEPS	:	Adduction d'Eau Potable Simplifiée
ANAM	:	Agence Nationale de la Météorologie
BF	:	Borne Fontaine
BNDT	:	Base Nationale des Données Topographiques
BP	:	Branchement Particulier/Privé
CC	:	Changements Climatiques
CCI	:	Climat Change Initiative
CCNUCC	:	Convention Cadre des Nations–Unies sur les Changements
CLE-HC	:	Comité Local de l'Eau-Haute Comoé
CMIP	:	Coupled Model Intercomparison Project (projet d'inter
DGESS	:	Direction Générale des Etudes et Statistiques Sectorielle
DGRE	:	Direction Générale des Ressources en Eau
DRAAHA-Cas Agricoles des Cascades	:	Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-
DRRAH-Cas Cascades	:	Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques des
ESA	:	Agence Spatiale Européenne
FAO	:	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et la Faim)
GES	:	Gaz à Effet de Serre
GIEC	:	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du
GIRE	:	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GWP	:	Global Water Partnership
HEC-HMS	:	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
INE	:	Institut National de l'Eau
INSD	:	Institut National de Statistique et de la Démographie
IRAS	:	Interactive River-Aquifer Simulation
IRD	:	Institut de Recherche et du Développement
LC	:	Land Cover
LWD	:	Land and Water Development

MAHRH Halieutiques	:	Ministère de l’Agriculture, de l’Hydraulique et des Ressources
MCG	:	Modèles Climatiques Globaux
MEA	:	Ministère de l’Eau et Assainissement
MEE	:	Ministère de l’Environnement et de l’Eau
MEF-SNAT	:	Ministère de l’Economie et des Finances
MERIS	:	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
NSE	:	critère de Nash et Sutcliffe
OMM	:	Organisation Météorologique Mondiale
ONEA	:	Office Nationale de l’Eau et de l’Assainissement
ONG	:	Organisation Non Gouvernemental
ORSTOM	:	Office de la Recherche Scientifique et Technique d’Outre-Mer
PAGIRE	:	Plan d’Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PANA	:	Programme National d’Adaptation aux Changements
PBIAIS	:	Pourcentage de Biais
PNGIRE	:	Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources
RCP	:	Représentative Concentration Pathway
RESO	:	Programme de valorisation des Ressources en Eau dans le Sud
RSR	:	le rapport de la racine carrée de l’erreur quadratique moyenne
SDAGE	:	Schémas Directeurs d’Aménagement et de Gestion de l’Eau
SDR	:	le Ratio de Déviation Standard
SDRE	:	Service du Développement des Ressources en Eau
SEI	:	Stockholm Environment Institute
SIG	:	Système d’Information Géographique
SN-SOSUCO	:	Nouvelle Société Sucrière de la Comoé
SPI	:	Indice Standardisé des Précipitations
UAC	:	Université d’Abomey Calavi
UBT	:	Unité de Bétail Tropical
USGS	:	United States Geological Survey
WEAP	:	Water Evaluation and Planning System

Liste des tableaux

Tableau 1 : Informations sur les stations24

Tableau 2:Paramètres de base pour la modélisation des besoins en eau du cheptel27

Tableau 3 : Extension des périmètres irrigués formels37

Tableau 4 : Bilan de l’eau au calage et à la validation avec HEC-HMS41

Tableau 5 : Critères de performance au calage et à la validation avec HEC-HMS41

Tableau 6: Critères de performance au calage et à la validation avec HEC-HMS44

Tableau 7: Critères de performance du modèle climatique suivant le scénario RCP8.553

Tableau 8:Critères de performance du modèle climatique suivant le scénario RCP4.554

Liste des figures

Figure 1 : Illustration de la pression sur le Bassin (WAIPRO-CILS-IWMI, 2010)	14
Figure 2 : Carte de la localisation du sous bassin versant de la Haute Comoé	17
Figure 3 : Carte de la géologie du sous bassin versant de la Haute Comoé	18
Figure 4 : Carte de l'occupation des sols et de la végétation du sous bassin versant de la Haute Comoé	19
Figure 5 : Variabilité interannuelle de la pluie moyenne annuelle du sous bassin versant de la Haute-Comoé	21
Figure 6 : Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de la Haute Comoé	22
Figure 7 : Carte des types de sol du sous bassin versant de la Haute Comoé	23
Figure 8 : L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS (Choayb, 2016).....	32
Figure 9 : Structure du modèle pour le sous bassin de la Haute Comoé	34
Figure 10 : Hydrogramme des débits simulés et observés sur la période de calage avec HEC-HMS	40
Figure 11 : Hydrogramme des débits simulés et observés sur la période de validation avec HEC-HMS.....	41
Figure 12 : Hydrogramme des débits observés et simulés sur la période de calage avec WEAP 21 (1991 à 2005).....	42
Figure 13 : Hydrogramme des débits observés et simulés sur la période de validation avec WEAP 21 (2006 à 2020).....	43
Figure 14 : Courbes des demandes et disponibilité en eau mensuelles	44
Figure 15 : Répartition des besoins en eau annuelles dans le bassin par type d'usage.....	44
Figure 16 : Taux de satisfaction des besoins en eau des usagers en 2020.....	45
Figure 17 : Demande en eau non satisfaite des usagers sur la période 2020-2050 si le climat est pareil qu'en 2020	46
Figure 18 : Demande en eau mensuelle non satisfaite sur la période 2020-2050 si le climat est pareil qu'en 2020	47
Figure 19 : Courbe d'évolution du nombre d'abonnés au réseau ONEA à l'horizon 2050	48
Figure 20 : Demande en eau non satisfaite suite à l'augmentation du nombre d'abonnés au réseau ONEA à l'horizon 2050 si le climat est pareil qu'en 2020.....	49
Figure 21 : Courbe d'évolution des périmètres agricoles à l'horizon 2050	50
Figure 22 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario d'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050 si le climat est pareil qu'en 2020	51
Figure 23 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant le scénario d'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050 si le climat est pareil qu'en 2020	52
Figure 24 : Evaluation des corrections de biais des données de températures	53
Figure 25 : Evaluation des corrections de biais des données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP8.5	53
Figure 26 : Evaluation des corrections de biais de données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP4.5	54
Figure 27 : Evaluation des corrections de biais de données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP4.5	54
Figure 28 : Demande en eau non satisfaite suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon 2050.....	55
Figure 29 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon 2050	56
Figure 30 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario combiné du changement climatique et l'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050	57
Figure 31 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant le scénario combiné du changement climatique et l'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050	58
Figure 32 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario de nouvelle technique d'irrigation à l'horizon 2050	59
Figure 33 : Demande non satisfaite suivant le scénario « nouvelles sources d'approvisionnement » à l'horizon 2050 ..	60

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Sigles et abréviations	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	ix
Introduction générale.....	12
1. Contexte et justification de l'étude.....	13
2. Revue de littérature	14
3. Problème et questions de recherche	15
4. Objectifs du mémoire	15
4.1. Objectif général	15
4.2. Objectifs spécifiques	16
5. Hypothèses de travail	16
6. Limites de l'étude.....	16
7. Résultats attendus.....	16
Les résultats attendus sont :.....	16
8. Nouveauté de l'étude.....	16
Chapitre 1 : Milieu d'étude	17
1.1. Localisation	17
1.2. Géomorphologie, géologie et hydrogéologie	17
1.3. Végétation et occupation des sols.....	19
1.4. Climat et hydrographie	20
1.5. Types de sols	22
1.6. Quelques aspects socio-économiques.....	23
Chapitre 2 : Données, matériel et méthodes	24
2.1. Données utilisées.....	24
2.1.1. Données hydrométriques	24
2.1.2. Données climatiques.....	24
2.1.3. Données sur les sites de captage.....	25
2.1.4. Données socio-économiques	25
2.2. Matériel utilisé.....	27
2.2.1. Outils SIG.....	27
2.2.2. Outil Khronostat	27
2.2.3. CropWat et Climwat.....	27
2.2.4. Modèle hydrologique HEC-HMS.....	28
2.2.5. Outil WEAP.....	28
2.3. Méthodes	28
2.3.1. Collecte des données	28
2.3.2. Critiques des données	29
2.3.3. Présentation du modèle WEAP 21 et du modèle HEC-HMS.....	30
2.3.4. Application du modèle WEAP à la zone d'étude.....	33
2.3.4.1. Définition de l'étude	33
2.3.4.2. Réglage des paramètres généraux.....	34
2.3.4.3. Calage et validation du modèle WEAP	34
2.3.4.4. Priorité d'allocation	36
2.3.4.5. Elaboration des scénarios de gestion	37
2.3.4.6. Elaboration des scénarii d'optimisation.....	39

Introduction générale

Pays sahélien, le Burkina Faso se caractérise par une économie très dépendante de l'agriculture qui, elle-même, est tributaire de la pluviométrie. En effet, le secteur primaire (agriculture, élevage, forêts, faune pêche) contribue entre 35 à 40% à la formation du PIB réel et engage plus de 84% de la population active (Institut National de la Statistique et de la Démographie, 2007). Quant à l'agriculture, elle constitue le secteur d'activité qui emploie le plus d'actifs et est la principale source de revenu pour 88-90% des actifs au Burkina Faso (Chambre de commerce d'industrie et d'artisanat du Burkina Faso, 2006). Par ailleurs, le contexte burkinabè est marqué par une démographie sans cesse galopante même si les taux d'accroissement, avec une moyenne de 2,3% sur la dernière décennie, ne sont pas des plus alarmistes de la sous-région. Mais à ce rythme la population atteindra 20 millions d'habitants en l'an 2026, ce qui pourrait poser avec plus d'acuité le problème d'insécurité alimentaire et de pression sur les ressources naturelles dont les ressources en eau. La problématique des ressources en eau au Burkina Faso est marquée par la baisse tendancielle de la pluviométrie, les pressions sur les ressources disponibles par la population en perpétuelle croissance, les changements climatiques résultantes des activités anthropiques avec pour conséquences l'aggravation de certains phénomènes comme la destruction des habitats aquatiques, l'érosion éolienne et hydrique, les rejets de déchets et diverses pollutions (MAHRH, 2009). Selon la même source cette situation compromet la durabilité de la ressource au risque d'hypothéquer les options de développement du pays. Conscient de ce problème, l'une des prérogatives du gouvernement Burkinabè est de rendre l'agriculture moins dépendante de la pluie et de maîtriser partiellement ou totalement les crues en vue d'étaler, de diversifier, d'intensifier et de sécuriser la production agricole dans le temps et l'espace. Pour cela l'Etat burkinabè met l'accent sur l'agriculture irriguée. Ainsi dans plusieurs régions du Burkina, les initiatives visant à promouvoir la petite irrigation sont en pleine expansion (Traoré et al., 2013; Wellens et al., 2014) à l'exemple du sous bassin versant de la Haute Comoé, dans la région des Cascades. Ce sous bassin versant renferme d'importantes ressources en eau qui se répartissent entre plusieurs utilisations notamment pour des besoins domestiques (alimentation en eau potable), agricoles (irrigation) et des besoins industriels (production industrielle de canne à sucre, extraction de minerais) (WAIPRO-CILS-IWMI, 2010). Les demandes en eaux étant diverses, l'on assiste à de pénuries chroniques en eau d'irrigation et à des conflits entre usagers de l'eau rendant délicate la gestion de la ressource à l'échelle locale. Conscient de cet état, le Burkina Faso s'est engagé depuis le sommet du millénaire pour le développement durable de Rio en 1992, dans le processus de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) par l'adoption en 2003 d'un Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE). Dans cette dynamique novatrice, l'Etat ambitionne ainsi une opérationnalisation de la GIRE sur toute l'étendue du territoire.

Face à la complexité d'application de la notion de GIRE, des initiatives ont été entreprises pour le développement d'outils logiciels pour aider les gestionnaires et les décideurs à collecter les informations, modéliser les processus et à prendre les meilleures décisions. Parmi les nombreux logiciels disponibles, WEAP (Water Evaluation and Planning System) se positionne comme le meilleur outil d'aide à la décision dans le rapport « Nile Basin capacity Building network » (2010) et a été utilisé comme outil de modélisation de l'allocation des ressources en eau dans plusieurs études (Nouiri et al., 2015).

1. Contexte et justification de l'étude

Le bassin versant du fleuve Comoé est situé dans la partie occidentale de l'Afrique entre les longitudes 2,45° et 5,58° ouest et les latitudes 5,10° et 10,29° nord. Le choix du bassin de la Comoé pour mener la présente étude est justifié par le fait de l'importance des ressources en eau dans la zone et de la complexité de sa gestion dû à la forte mobilisation d'acteurs pour différents usages de l'eau. En effet, le bassin de la Comoé est l'une des zones du Burkina Faso marquée par l'intensité de la production agricole de contre saison à travers le développement de l'irrigation. Avec sa population croissante et multiculturelle le bassin de la Comoé se trouve ainsi au carrefour de tous les usages pour le développement. Le bassin de la Comoé y compris le sous bassin contient près de 4 980 ha de périmètre irrigués et d'environ 1 880 ha de bas-fonds aménagés (Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2001). Les grands acteurs présents sont notamment la Nouvelle Société Sucrière de la Comoé (SN SOSUCO) avec environ 4 000 ha de plantation de canne à sucre, l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) approvisionnant la ville de Banfora et de Bérégadougou en eau domestique, le périmètre irrigué de Karfiguéla (350 ha) et les maraichers installés le long des cours d'eau.

Par rapport à une disponibilité en eau de surface estimée à 50,66 millions de m³ en saison sèche (Etkin et al., 2015), la demande exprimée par les usagers pour l'irrigation au cours de cette période, s'élevait à environ 110 millions de m³ (Roncoli et al., 2009). Au cours de la campagne sèche, les volumes d'eau prélevés par les maraichers et la Société sucrière de la Comoé (SOSUCO) semblent respectés les normes, définies par FAO (2017) en termes de besoins en eau recommandés. Le riz, dont le cycle cultural dure quatre mois, semble être sur irrigué. En effet, selon DANIDA (1991), 30 millions de m³ d'eau ont été prélevés par la société sucrière pour l'irrigation au cours de la campagne agricole de saison sèche. Cette valeur, bien que datant du début des années 1990, semble toujours être encore valable, au regard des demandes en eau exprimées ces dernières années par la société auprès du Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé (CLE-HC), qui sont en moyenne de l'ordre de 32,51 millions de m³ par campagne sèche de 2015 à 2017.

Dans le périmètre rizicole, le prélèvement d'eau journalier d'environ 22 500 m³ (Ballo, 2010) est réalisé pour l'irrigation du riz dont le cycle cultural est de 120 jours, soit un volume total d'eau prélevé de près de 2,7 millions m³ en fin de cycle. Enfin pour les maraichers, une étude commanditée en 2018 par l'Agence de l'Eau des Cascades, estimait leur prélèvement à 24,836 millions de m³. Ces nombreux usages de l'eau entraînent une grande pression sur les réserves en eau dans le sous bassin (Figure 1) témoin de nombreux conflits - parfois violents - entre les différents usagers des points d'eau depuis de nombreuses années. Les flux migratoires vers la zone accentuent la pression sur les ressources locales en eau. Par exemple en 1995, la tension est devenue extrême entre les groupes en présence et a entraîné des pertes en vie humaine (Yéo, 2008).

Les outils numériques qui sont des supports à la décision dans la gestion de la ressource en eau, connaissent actuellement un essor prodigieux chez les scientifiques de nombreux organismes gouvernementaux et centres de recherche à travers le monde. Cet essor coïncide avec le passage d'un mode de gestion traditionnel axé sur l'intervention à un mode de gestion intégrée des ressources axé sur la planification et le développement durable des ressources (Dupont et al., 2016).

C'est dans ce contexte socio-économique et environnemental diversifié que s'inscrit cette étude intitulée : **« Optimisation de l'allocation des ressources en eau dans une vision prospective : application du modèle WEAP 21 dans le sous bassin versant de la Haute Comoé au Burkina Faso ».**

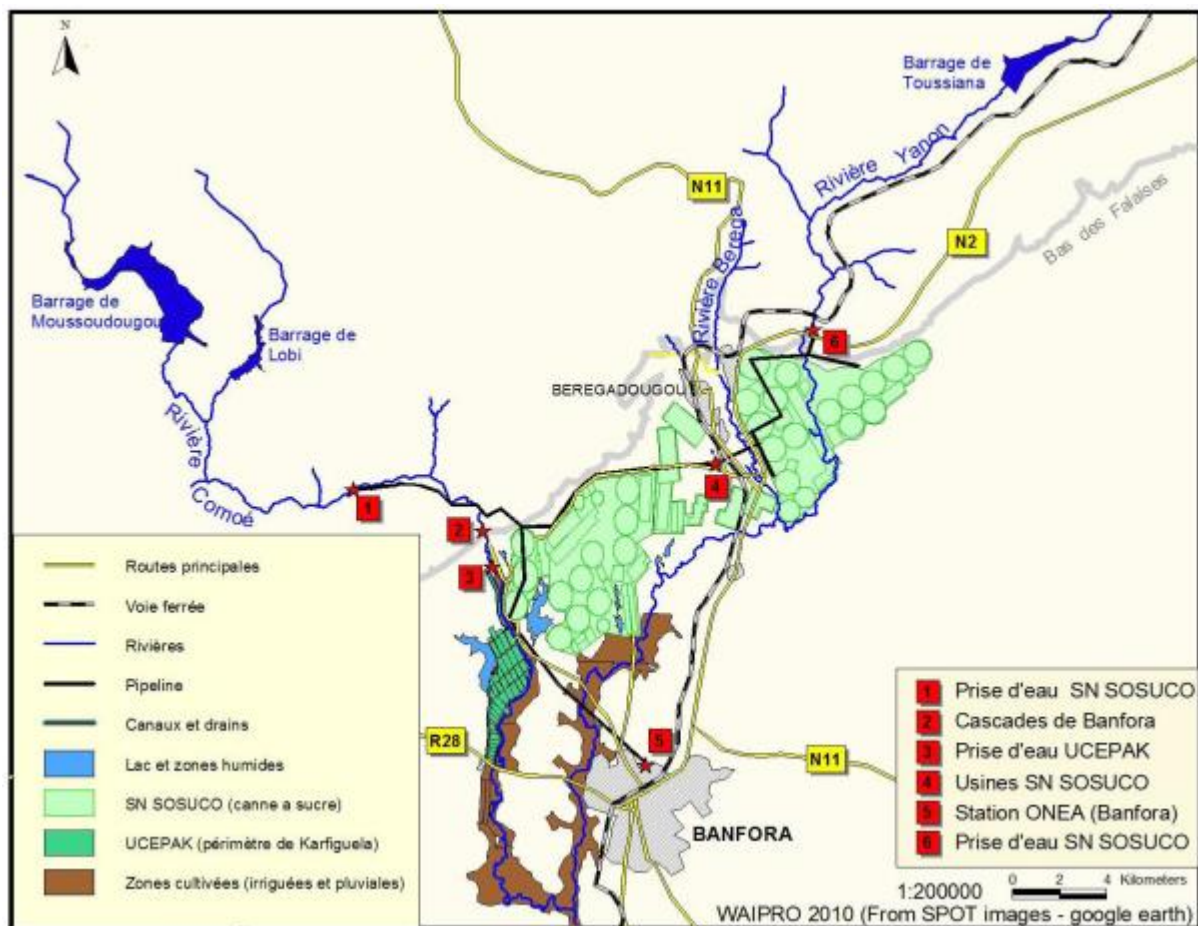


Figure 1 : Illustration de la pression sur le Bassin (WAIPRO-CILS-IWMI, 2010)

2. Revue de littérature

La littérature montre que plusieurs modèles pour la gestion des ressources en eau ont été développés dans la zone d'étude. Les modèles existants qui ont été relevés dans la littérature sont les suivants :

- Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer maintenant IRD (Orstom, 1997): il s'inspire du modèle HYDRAM qui est un modèle basé sur UNIX ;
- Association Eau Développement et Environnement (AEDE, 2009) : Aucun outil n'a été mis au point, seules les ressources en eau et les demandes ont été estimées grâce à un programme excel ;
- le développement de deux différents Outils de Simulation de Barrage (OSB) sous le projet intitulé « Amélioration des ressources en eau dans la zone Soudano-sahélienne, cas du Burkina Faso » (2009) par les universités de la Géorgie et de Tuft. Les deux OSB sont le Multi-Stage Stochastic Linear Program (MSSLP) et le Comoé simulation tool (CST) présenté au CLE.

Étant donné que le modèle HYDRAM est fonctionnel sous UNIX, il ne peut être aisément utilisé que par les utilisateurs ayant Windows OS. De plus le MSSLP étant un outil très complexe, ces deux outils ne connaissent pas une grande utilisation de la part des gestionnaires de l'eau. Le seul outil existant qui est actuellement utilisé et apprécié est le CST. Néanmoins, le MSSLP a été décrit et son utilisation est possible sur la base de la documentation fournie par ses concepteurs.

Le MSSLP est un outil qui a été développé et conçu pour optimiser la gestion de trois barrages et les usages d'eau dans la zone d'étude.

Le CST a été développé pour répondre aux demandes formulées par les membres du CLE. Il s'agit d'un modèle de simulation déterministe plus simple que le MSSLP. Le CST a donc été élaboré premièrement pour identifier les usages de l'eau et les demandes exprimées afin de faciliter la communication entre les usagers de l'eau dans le CLE. Les concepteurs du modèle MSSLP ont envisagé de le mettre à la disposition du CLE une fois que ce dernier aura maîtrisé l'utilisation du CST.

Höllermann et al. (2010) ont modélisé le bilan hydrique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou à l'aide du logiciel WEAP. Cette étude a analysé la situation future de l'eau du Bénin selon différents scénarios de développements socioéconomiques et du changement climatique jusqu'à 2025.

Et plus récemment, Chabi et al. (2019) ont évalué le bilan hydrique du réservoir de Ilauko de la société SUCOBÉ SA avec WEAP, qui est située dans le bassin versant de l'Ouémé au niveau de Save au Bénin.

Droogers et al. (2011) ont utilisé comme outil de modélisation le logiciel WEAP pour la gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou au Maroc dans l'objectif d'évaluer l'impact des trois mesures de gestion de l'eau (demande, approvisionnement et analyse coûts-avantages).

Alfarra et al. (2011) ont construit un modèle de gestion à l'aide du logiciel WEAP pour évaluer la variation d'approvisionnement en eau. Ils ont décrit ensuite cinq scénarios alternatifs d'approvisionnement en eau pour leur zone d'étude : Situation habituelle, l'utilisation des eaux usées traitées dans l'irrigation, le changement climatique, et deux autres scénarios combinés sur le changement climatiques avec l'augmentation de la réutilisation, et les modes agricoles pour calculer l'impact sur l'écart entre la demande d'approvisionnement jusqu'à 2050.

Hadded et al. (2013) ont développé un outil d'aide à la décision par le couplage de WEAP avec le logiciel de modélisation des eaux souterraines MODFLOW. Le DSS (Decision Support Systems) calé a été utilisé pour évaluer les impacts des aménagements et du dessalement de l'eau de mer sur les niveaux piézométriques des points de contrôle. La recherche a montré que la méthodologie utilisant WEAP est efficace pour disposer d'un outil de modélisation robuste et flexible.

Bougma (2020), Ouédraogo (2020) et Saouto (2016) ont utilisé le modèle WEAP 21 pour mettre en place une stratégie appropriée visant à sécuriser la demande future en eau et à assurer la répartition optimale de ces ressources entre les différents secteurs respectivement dans le sous bassin versant de la Léraba orientale, le bassin du Nakanbé supérieur et dans le complexe de bassins versants Mouhoun-Sourou au Burkina Faso.

3. Problème et questions de recherche

Afin d'apporter une solution au problème posé nous tenterons de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la quantité actuelle des ressources en eau du bassin et comment est-elle gérée ?
- Dans quelles mesures la démographie, le besoin croissant en terres cultivables et les effets du changement climatique vont-ils impacter la disponibilité des ressources en eau de la Haute Comoé ?
- Quelles mesures adopter pour contribuer à garantir un accès durable à l'eau à tous les usagers ?

4. Objectifs du mémoire

4.1.Objectif général

L'objectif principal de cette étude est de mettre en place une stratégie appropriée visant à sécuriser la demande future en eau et à assurer la répartition optimale de ces ressources entre les différents usages.

4.2. Objectifs spécifiques

De façon spécifique, il s'agit de :

- évaluer les ressources en eau disponibles;
- simuler l'évolution des ressources en eau du bassin et des prélèvements à l'horizon 2050 à l'aide du modèle WEAP21;
- proposer des choix de gestion durable des ressources en eau du bassin.

5. Hypothèses de travail

Un travail ne peut être considéré comme une véritable recherche s'il n'est pas structuré autour d'une ou de plusieurs hypothèses. Les hypothèses constituent le point de départ de la démonstration et indiquent quelles pistes explorer pour la recherche. Ainsi, nous formulons les hypothèses suivantes :

- les ressources en eau du bassin vont connaître une diminution significative eu égard aux pressions anthropiques et aux effets du changement climatique ;
- malgré le changement climatique, l'application d'une démarche de gestion intégrée permettra de satisfaire les besoins en eau des différents secteurs utilisateurs.

6. Limites de l'étude

Cette étude, par manque de données d'entrée, n'a pas pris en compte l'effet de la sédimentation sur la disponibilité de la ressource en eau ainsi que l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux du bassin versant.

7. Résultats attendus

Les résultats attendus sont :

- les ressources en eau disponibles sont évaluées et les différents usagers identifiés;
- l'évolution des ressources en eau ainsi que les prélèvements sont simulés jusqu'à l'horizon 2050 grâce au modèle WEAP21;
- des choix de gestion durable des ressources en eau du bassin sont proposés.

8. Nouveauté de l'étude

Zerbo (2017) dans son mémoire intitulé « Etat de la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans le sous bassin versant de la Haute Comoé au Burkina Faso » a déclaré ceci pour conclure : « Vu la complexité d'un tel sujet, un travail d'amélioration des travaux de modélisation de la gestion des eaux de surface est nécessaire dans le sous bassin. Notre travail pourrait ainsi servir de base pour d'autres études notamment dans le cadre de l'utilisation des nouvelles technologies de l'information géographique (outils de télédétection, outils de planification intégrée des ressources en eau etc.) dans les processus d'optimisation de la gestion des ressources en eau. ». Cela dénote à quel point la question de l'optimisation de la gestion des ressources en eau est un point très sensible qui devrait être abordé de façon pointue.

Cette approche de modélisation avec WEAP 21 serait la première du genre dans le sous bassin versant de la Haute Comoé.

Le présent mémoire est structuré en cinq (05) parties qui sont l'introduction, la conclusion et trois (03) chapitres. Le premier chapitre traite du milieu d'étude, le second aborde les moyens matériels et la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de l'étude et enfin le troisième chapitre présente les résultats et la discussion.

Chapitre 1 : Milieu d'étude

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant (sols, végétation, géologie, climat etc.) jouent un rôle essentiel dans les phénomènes de transfert d'eau. En effet, ces paramètres se combinent selon leur influence pour déterminer les modalités de l'écoulement. L'objectif principal de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques du sous bassin versant de la Haute Comoé. Cette partie sera donc avant tout descriptive.

1.1. Localisation

Le bassin versant de la Haute Comoé est un espace géographique situé dans le sud-ouest du Burkina Faso (Figure 2). Il est à cheval entre les régions des Hauts Bassins et des Cascades et s'étend entre les latitudes (10°30'N et 11°10'N) et les longitudes (04°10'W et 05°20'W). Le bassin de la Haute Comoé est un sous bassin du bassin national de la Comoé. C'est la partie la plus en amont du bassin et draine une superficie d'environ 1928 Km².

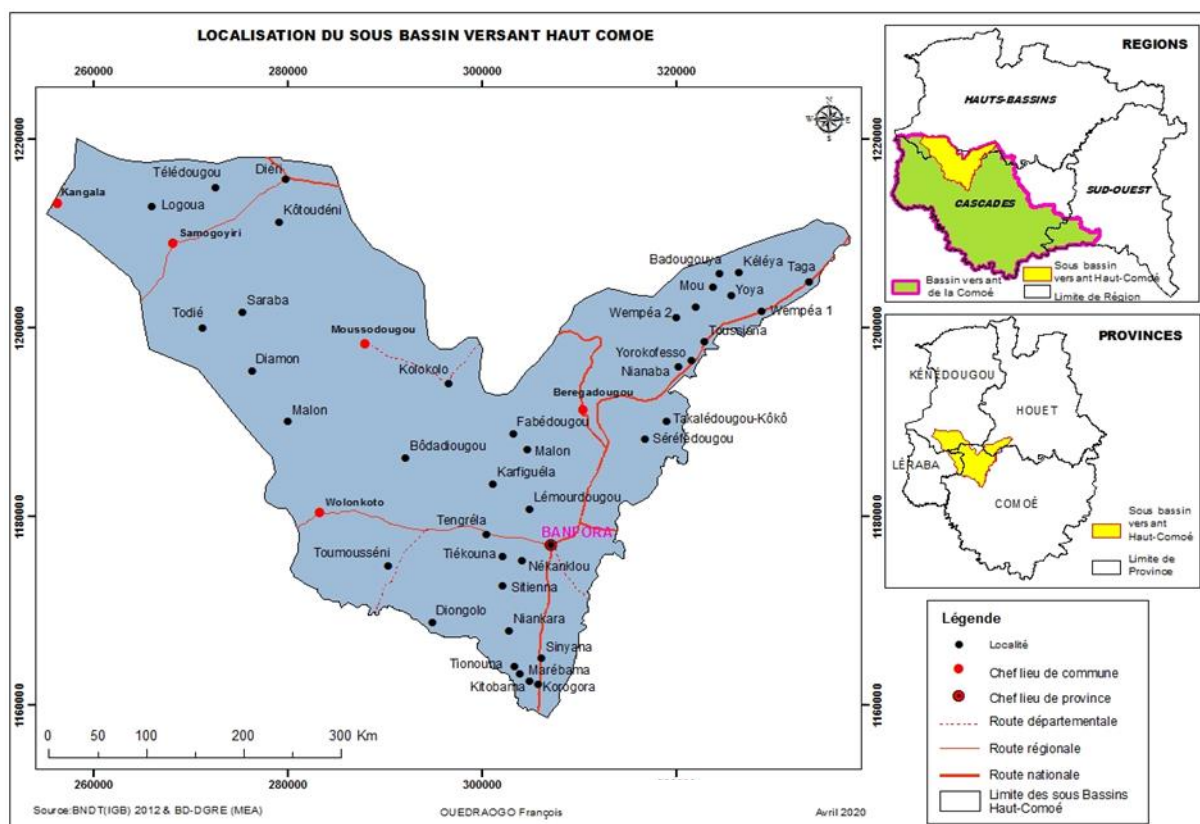


Figure 2 : Carte de la localisation du sous bassin versant de la Haute Comoé

1.2. Géomorphologie, géologie et hydrogéologie

• Géologie

La Haute Comoé est un exemple particulier de regroupement de formations sédimentaires et de socle (Figure 3). Elle possède l'un des plus grands potentiels pour l'exploitation des eaux souterraines au Burkina Faso (PADI-BF 101, 2013).

Deux grandes formations géologiques structurent le bassin de la Haute Comoé au Burkina Faso :

- Les formations cristallines qui sont largement prédominantes, sont diversement constituées de roches à dominance granito-gneissique ou migmatique, schisto-gréseuse ou volcano-sédimentaire. Elles occupent les parties centrales et sud du bassin.
- Les formations sédimentaires dans lesquelles se sont logés des filons de dolérite, constituent

la bordure sud du bassin sédimentaire de l'ouest burkinabé et sont formées des Grès de Kawara-Sindou (GKS), des Grès à Granule de Quartz (GGQ), des Grès Fin Glauconieux (GFG), des Grès Inférieur (GI) et de Filons de dolérite (PADI-BF 101, 2013).

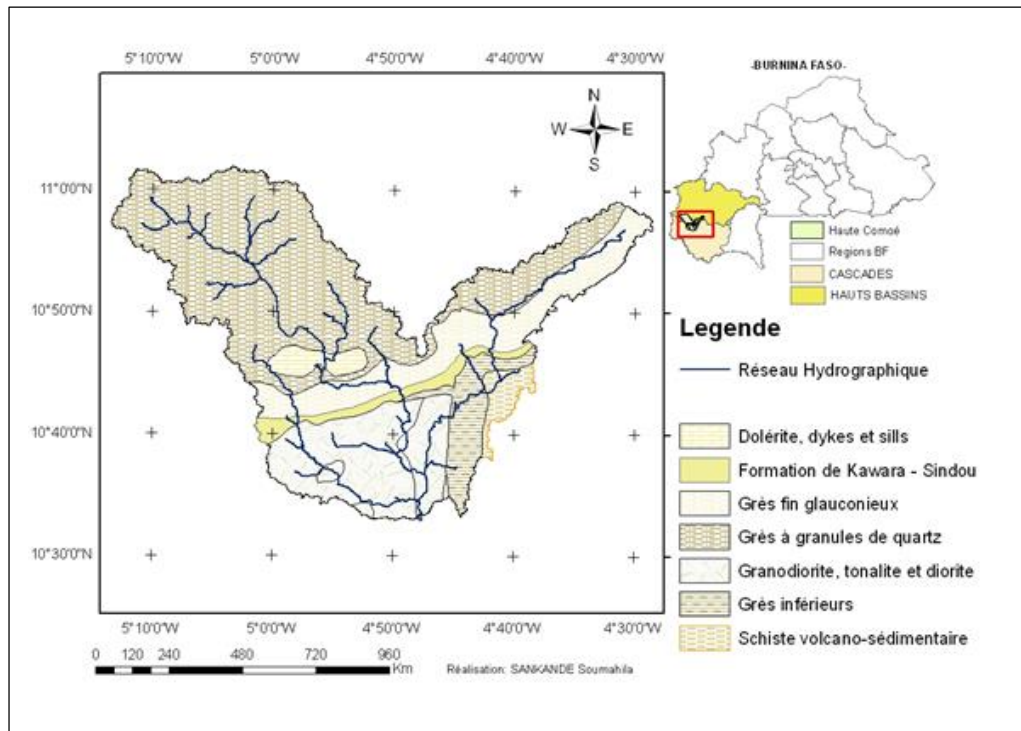


Figure 3 : Carte de la géologie du sous bassin versant de la Haute Comoé

• Géomorphologie

Sur le plan géomorphologique, le bassin présente sur sa partie nord, un relief accidenté avec une altitude comprise entre 257 et 712 m. C'est dans cette zone que se trouvent la falaise de Banfora, les chutes de Karfiguéla, de Tourni et le mont Ténakourou. La partie sud est constituée d'une vaste plaine, avec un relief plus monotone. La pente moyenne y est faible (0,70m/km), et l'altitude est généralement inférieure à 400 m. Le point le plus bas est atteint dans le bassin du Kodoun, à la sortie du territoire burkinabé, avec 215 m d'altitude (PADI-BF 101, 2013).

La plaine alluviale de Karfiguéla qui englobe le périmètre rizicole et maraîcher dudit village est caractérisée par cinq (5) groupes de formations géologiques : Ce sont la formation de Kawara Sindou, la formation des grès inférieurs, la formation des schistes et volcano-sédiments, la formation des granodiorites et le groupe tonalitique.

- Les grès de Kawara Sindou (60 à 350 m d'épaisseur) reposent sur le grès inférieur ou directement sur le socle. C'est une formation constituée de grès quartzite très fin à la base et de grès grossier au-dessus. Elle est caractérisée par une stratigraphie oblique et la présence d'abondante ride de vague ;
- Les grès inférieurs (50 à 300 m d'épaisseur) reposent en discordance sur le socle. La formation est constituée successivement de la base au sommet de grès rouge fin, de grès quartzite fin et de grès rouge à débit schisteux ;
- Les schistes et volcano-sédiments : Ces roches présentent une certaine complexité. En effet, à l'altération, elles peuvent être difficiles à différencier avec les roches andésitiques schistosées et altérées. Globalement, il s'agit de pélites, de schistes gréseux, de schistes lustrés gris-noir, des schistes tuffacés ainsi que de rares horizons quartzitiques ;

- Les granodiorites sont des roches grenues, mésocrates à minéraux relativement riches en ferromagnésiens et feldspaths. Elles constituent la majeure partie du socle au niveau de notre site d'étude ;
- Le groupe des tonalites : Il comprend un certain nombre de faciès de composition allant de la granodiorite à la tonalite et la diorite quartzifère. Ces roches sont globalement très voisines. Elles sont de grain moyen à grossier, présentant une fabrique planaire ou une foliation gneissique nette. Localement, un rubanement est associé à la foliation et donne à la roche un aspect de migmatite. Elles sont généralement recoupées par des filons d'aplite ou de pegmatite. Dans ces roches le plagioclase prédomine le feldspath potassique, le quartz, l'amphibole et la biotite sont moins abondants.

1.3. Végétation et occupation des sols

L'importance des précipitations dans la Haute Comoé favorise le développement d'espèces ligneuses dont la densité de peuplement, le nombre de strates et la hauteur sont importantes. On retrouve des forêts galeries le long des rivières où l'écoulement est pérenne et dans les vallées et ravins à humidité permanente.

Le Nord du bassin est caractérisé par la présence de graminées. C'est le domaine de la forêt claire avec des arbres de taille moyenne (Figure 4). Les espèces les plus rencontrées sont le néré (*Parkia biglobosa*), le karité (*Butyrospermum parkii*) et le tamarinier (*Tamarindus indica*). Le tapis herbacé est essentiellement composé de thérophytes dont le cycle végétatif est étroitement lié au cycle pluviométrique. Toutefois, cette végétation connaît une forte dégradation sous l'effet d'actions anthropiques. Cela n'est pas sans conséquence sur les écoulements superficiels.

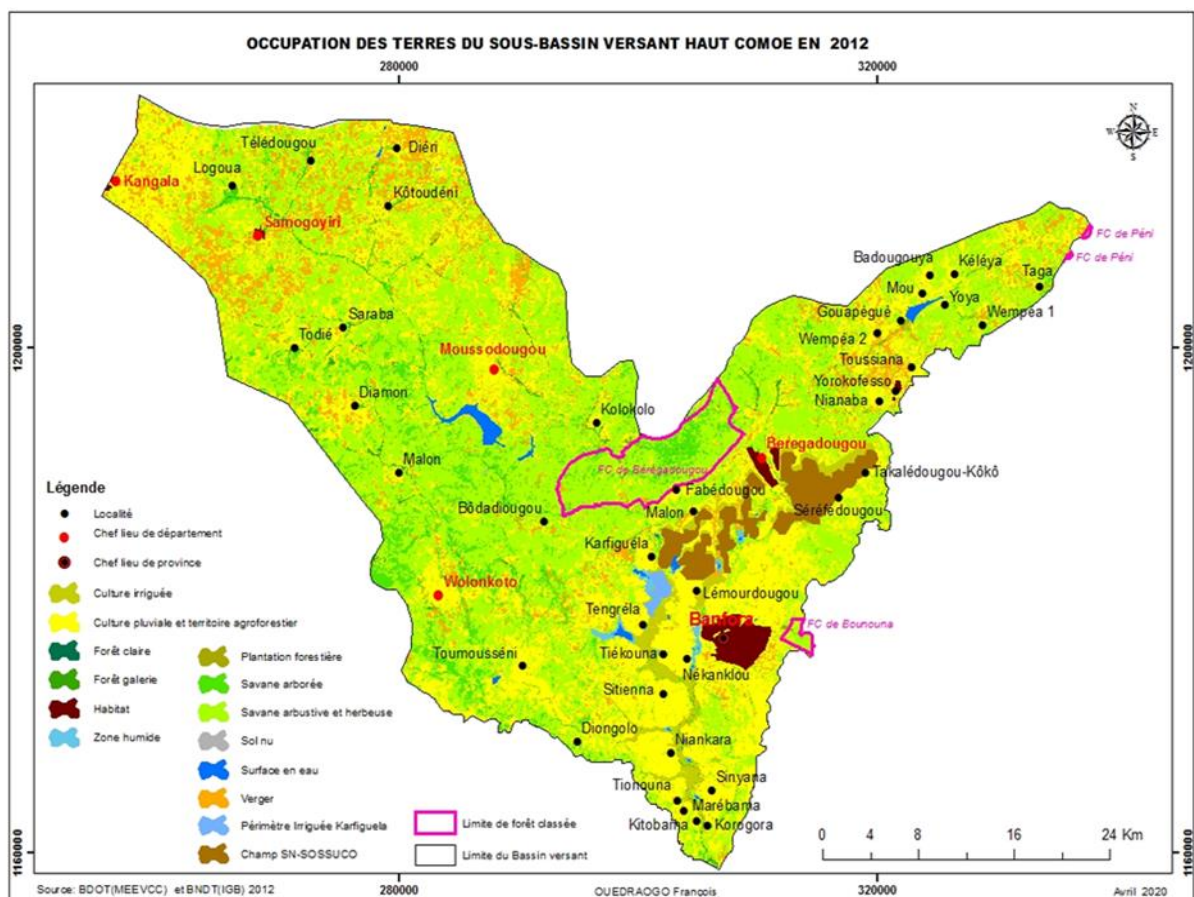


Figure 4 : Carte de l'occupation des sols et de la végétation du sous bassin versant de la Haute Comoé

1.4. Climat et hydrographie

• Climat

La position géographique du Burkina confère à son climat un caractère soudano-sahélien marqué par le déplacement du front inter tropical (FIT) qui détermine deux grandes saisons : la saison sèche et la saison des pluies. Leur durée respectivement est fonction de la latitude. La saison humide se raccourcissant vers le nord. Dans le sud-ouest, les latitudes sont les plus méridionales du Burkina et les conditions climatiques y sont les plus favorables : la saison des pluies dure 5 à 6 mois (Programme RESO, 1998). Deux stations météorologiques synoptiques existent, à Bobo-Dioulasso et Gaoua. Trois stations agro météorologiques importantes sont suivies à Banfora, Bérégadougou et Niangoloko.

L'amplitude thermique annuelle est faible : la température moyenne mensuelle minimale varie toute l'année de 17 à 22°C tandis que la température moyenne maximale varie de 33 à 37°C durant la période de novembre à avril et de 29 à 34°C de mai à octobre (Idrissa, 2006).

Les vents alternent suivant les saisons et sont liés au FIT. En saison sèche, lorsque le FIT redescend vers la côte de Guinée, le Burkina est soumis au régime d'un alizé continental de Nord-est dépassant rarement 5 m/s : l'harmattan. C'est un vent chaud, très sec et qui engendre des vents de sable dans le sahel et le sud saharien et donc aussi dans le sud-ouest Burkinabè, il en résulte parfois des journées de « brume sèche », constituée par la fraction la plus fine de ces vents de sable que l'harmattan emporte. L'effet desséchant de ces vents est accentué en mars/avril par la montée de la température.

En saison des pluies, on passe sous le régime de la mousson, avec un alizé austral humide du sud-ouest chargé de cumulus. A la jonction de ces deux saisons, lors du passage du FIT, le vent change de direction. Des cellules orageuses locales se développent et les cumulo-nimbus fusionnent parfois pour former de vastes masses cycloniques. Des vents violents les accompagnent et peuvent atteindre 120km/h. Au début de la saison des pluies, ces vents provoquent des tempêtes de poussières intenses mais brèves et à la fin de la saison des pluies, ils peuvent occasionner des dégâts aux cultures, couchant les céréales qui n'ont pas encore été récoltées (Programme RESO, 1998).

Le climat du Burkina Faso est caractérisé par : un rayonnement solaire global de forte intensité avec une nette prédominance des énergies comprises entre 2000 et 2600 joules / cm² / jour (soit 5555KWh/j/ m² à 7222 KWh/j/ m²), enregistrées de janvier à août dans la moitié nord du pays et de février à juin dans le Sud ; une longue durée d'insolation variant de 6 à 11 heures par jour (Programme RESO, 1998)

L'humidité relative annuelle moyenne est de 50%. Elle fluctue beaucoup selon la saison et est fonction du régime des vents et des masses d'air associées. Les alizés de la mousson amènent du golfe de Guinée un air humide, avec une hygrométrie moyenne de 80%. En saison sèche, l'harmattan fait descendre des zones sahariennes et sahéliennes un air très sec dont l'hygrométrie tombe à 20% en janvier (Programme RESO, 1998).

Les valeurs mensuelles minimales d'ETP sont observées en juillet et Août et sont en moyenne de 95 mm soit environ 3mm/j à Bobo-Dioulasso (amont de la Haute Comoé) et Gaoua (aval de la Haute Comoé). Entre l'évaporation annuelle au bac de classe A à Bobo-Dioulasso et celle sur une nappe d'eau libre, il a été établi un rapport de l'ordre de 75% à 80%. D'où une estimation de l'évaporation moyenne annuelle sur un plan d'eau de 1800 à 2200 mm (Programme RESO, 1998).

Le bassin de la Haute Comoé appartient au climat tropical de type sud-soudanien. Le régime des pluies lié au climat est tributaire des flux d'air qui circule des hautes pressions sahariennes à l'anticyclone de sainte Hélène. L'influence alternée des anticyclones est à l'origine des variations climatiques constatées :

- saison sèche : novembre à avril;
- saison des pluies : mai à octobre avec des périodes transitoires froides ou chaudes.

La figure 5 montre la variabilité interannuelle des pluies annuelles du sous bassin de la Haute Comoé sur la période 1991 à 2020

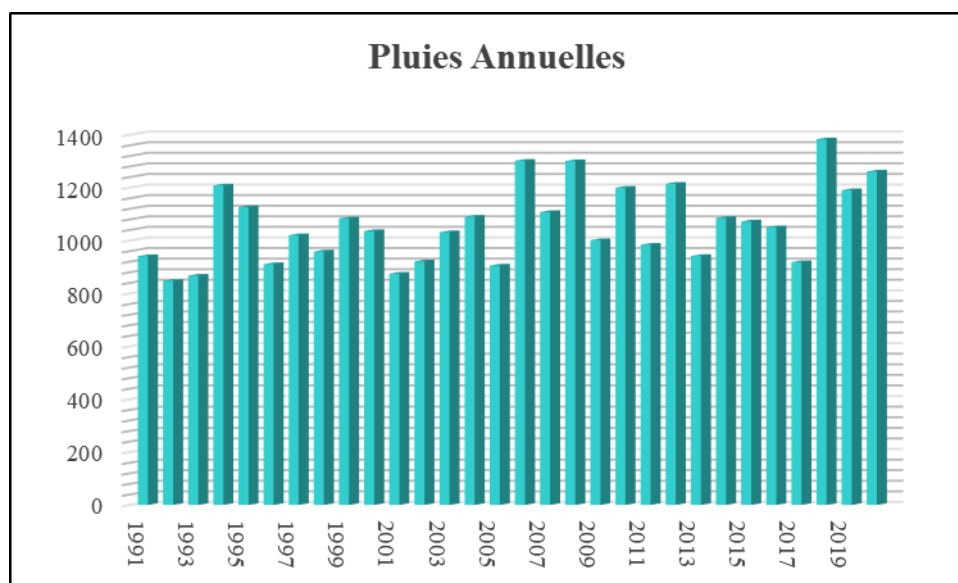


Figure 5 : Variabilité interannuelle de la pluie moyenne annuelle du sous bassin versant de la Haute-Comoé

• Hydrographie et régime hydrologique

Le Burkina est un pays intermédiaire entre les pays sahéliens du nord et les pays côtiers humides du sud. Cette position se reflète sur le plan hydrographique, sa partie sud-ouest abondamment arrosée possède un réseau développé et bien structuré, donnant naissance aux cours d'eau pérennes du pays et de nombreux lacs et mares pérennes (Mare aux hippopotames, Tengrela, Lémouroudougou, Karfiguéla), barrages (Toussiana, Moussodougou, Tiefora, etc.), des chutes d'eau (Comoé, Niofolo, Karfiguéla) (Programme RESO, 1998).

Le fleuve Comoé prend naissance au Nord-Ouest de Banfora à partir des deux ruisseaux issus des hautes falaises de Karfiguéla et Bérégadougou (Figure 6). La Comoé s'enrichit de nombreux affluents tertiaires avant d'être rejointe par la Léraba, son principal affluent, à la frontière Sud du Burkina Faso. Le relief accidenté de ce cours d'eau et son débit d'étiage soutenu permettent une exploitation importante de la ressource en eau. La baisse de la pluviométrie au cours de ces dernières années fait apparaître cependant des limites. Le bassin de la Haute Comoé a son exutoire défini par la station hydrométrique de Diarabakoko dont les coordonnées géographiques sont :

- Latitude : 10°28'37,51''Nord ;
- Longitude : 04°46'34,49''Ouest.

La station hydrométrique de Diarabakôkô fonctionne depuis 1955.

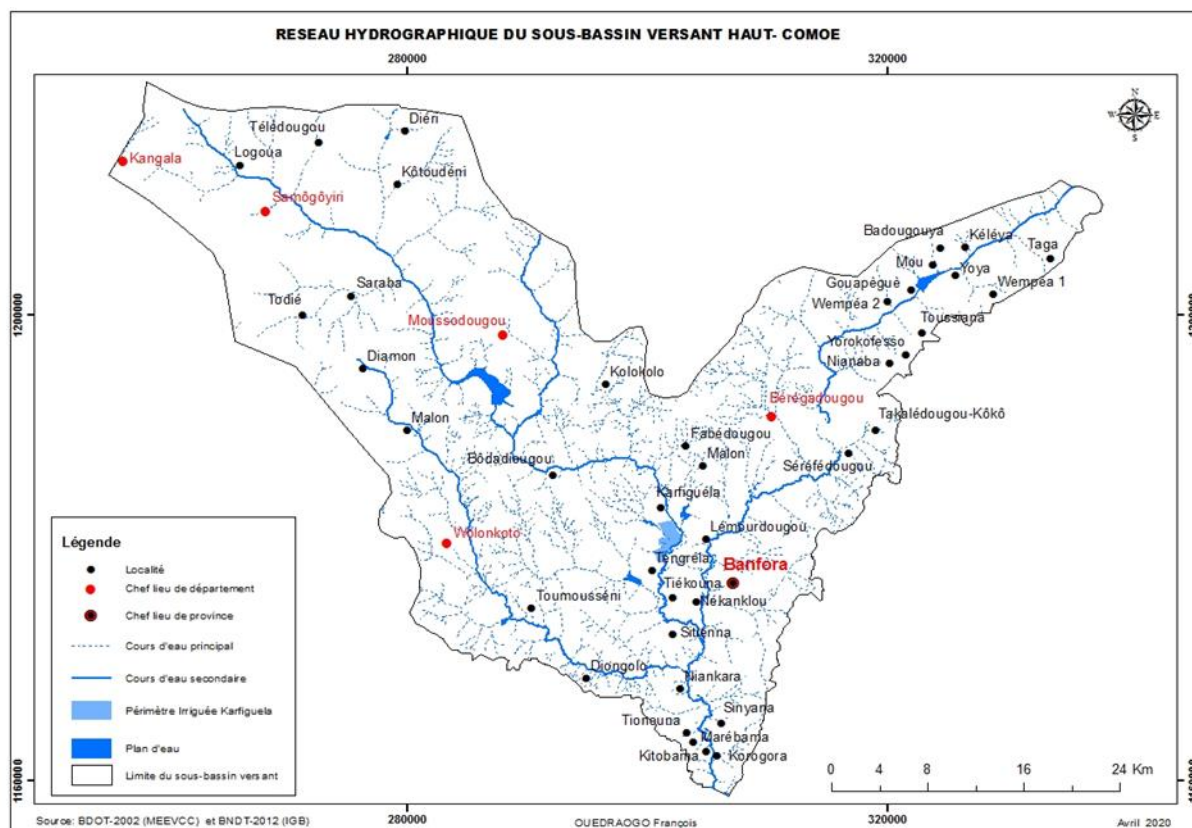


Figure 6 : Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de la Haute Comoé

1.5. Types de sols

L'analyse granulométrique des sols de la plaine aménagée de Karfiguéla fait ressortir deux grands types de sols : les sols lourds (argileux, argilo-limono- sableux et sablo-argileux) et les sols légers (sablo-limoneux et limoneux) qui dominent la majeure partie de la plaine.

- **Les sols lourds**

Les sols argileux sont caractérisés par un taux d'argile d'environ 35 à 55% avec une bonne capacité de rétention en eau. Ces types de sols se rencontrent dans la partie nord-ouest de la plaine. La présence des sols lourds est le résultat de la stagnation continue de l'eau dans les parcelles à cause du mauvais fonctionnement du réseau de drainage. On note également la remontée du fer par endroit s'expliquant par les phénomènes de remontées capillaires et d'oxydo-réduction. Les sols argileux ont une bonne capacité de rétention en eau avec une faible infiltration, ce qui les rend aptes à la riziculture (irriguée et de basfonds). Les sols sablo-argileux dominent la majeure partie de la plaine notamment dans sa partie médiane. Ces types de sols se prêtent mieux à la culture céréalière, au maraichage et à la riziculture de basfonds.

- **Les sols légers**

Ces sols présentent une texture plus fine dans les zones centrales et Est de la plaine marquée par la présence de limons fins à très fins. La partie nord est dominée par la présence de sables et de limons. Sur le plan pédologique on note, la présence de sols sablonneux dans les périmètres qui ne conviennent pas à la riziculture. En effet, ces sols se caractérisent par une forte perméabilité induisant ainsi une infiltration importante de l'eau. Cependant, ils pourraient mieux s'adapter à la culture céréalière et à la maraichiculture avec une meilleure gestion des pratiques culturales telles que le paillage et des amendements organiques.

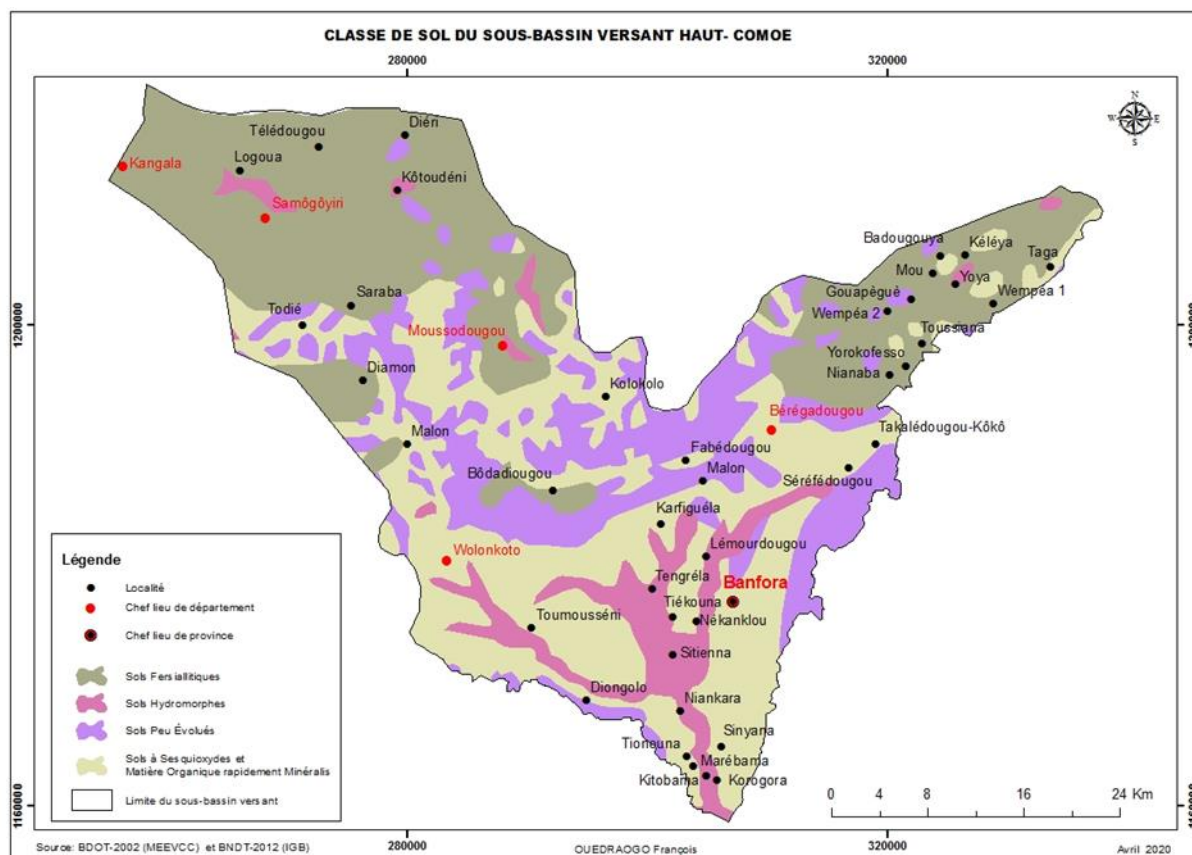


Figure 7: Carte des types de sol du sous bassin versant de la Haute Comoé

1.6. Quelques aspects socio-économiques

Pour comprendre l'évolution des ressources en eau du bassin de la Haute Comoé, il est important de connaître les événements qui ont marqués le développement du bassin. La société sucrière SN-SOSUCO et le périmètre irrigué de Karfiguêla ont été construits au début des années 1970, tandis que les barrages de Lobi (6,06 millions de m³), de Toussiana (6,1 millions de m³) et de Moussodougou (38,5 millions de m³) ont été respectivement construits en 1976, 1982 et 1991. L'équilibre qui y régnait a été "perturbé" (WAIPRO, 2010).

La SN-SOSUCO effectue une irrigation d'appoint pendant la saison des pluies et une irrigation totale pendant la saison sèche. Les barrages de Moussodougou, Lobi et de Toussiana forment un système complexe qui fournit de l'eau pour l'irrigation d'environ 4000 ha de plantations de canne à sucre de la SN-SOSUCO et à l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA pour l'Approvisionnement en Eau potable (AEP) de la ville de Banfora (70 000 habitants) au moyen d'un réseau de conduites). Les barrages et le réseau de conduites sont suivis par la SN-SOSUCO sur la base d'un protocole signé avec l'Etat Burkinabè. A ce titre, elle doit libérer un débit de 150 l/s, pour maintenir les chutes des cascades de Banfora (pôle touristique important) et le périmètre irrigué de Karfiguêla (350 ha). En outre, sur les rives de la Comoé, l'installation de près de 200 pompes permet le maraîchage sur une surface comprise entre 400 ha et 900 ha (WAIPRO, 2010).

Conclusion

La zone d'étude est située dans un sous bassin de la rivière Comoé dans le Nord du bassin de la Haute Comoé (Annexe 8). Elle a une superficie d'environ 1928 km² et comprend des utilisations multi-sectorielles de l'eau qui ont des impacts différents et importants sur les moyens de subsistance des populations locales et sur l'économie nationale dans son ensemble. En raison de la pluviométrie favorable et des caractéristiques du sol propices à l'agriculture, cette zone est considérée comme l'un des meilleurs potentiels agricoles du Burkina Faso.

Chapitre 2 : Données, matériel et méthodes

Dans ce chapitre, nous allons présenter les données utilisées et aussi tous les outils ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés.

2.1. Données utilisées

2.1.1. Données hydrométriques

Les données hydrométriques disponibles sont les débits moyens journaliers et mensuels à la station hydrométrique de Karfiguéla radier et de Diarabakôkô de 1976 à 2021. Ces débits comportent beaucoup de données manquantes, souvent sur une à plusieurs années. Nous avons donc considéré les données de 1991 à 2020 de la station de Diarabakôkô pour nos simulations dans le cadre de cette étude. Nous avons eu aussi recours aux données sur le niveau de remplissage du barrage de Moussodougou (1991-2020), Lobi (1991-2020) et Toussiana (1991-2020). Ces données nous ont été fournies par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE).

2.1.2. Données climatiques

Les données climatiques (précipitations, température, humidité relative, vitesse du vent, évapotranspiration) ont été fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) tandis que celles futures ont été téléchargées sur le site web KNMI Climate Explorer à l'aide du modèle climatique CMIP5 sur la période 2021-2050. Les données pluviométriques de 1991 à 2020 des stations de Banfora, Bérégadougou et Orodara ont servi au calcul de la pluie moyenne sur le bassin. Les données de température, d'humidité relative, de vitesse du vent, d'évapotranspiration sont celles de la station synoptique de Bobo Dioulasso observées sur la période 1991 à 2020. Le Tableau 1 donne quelques informations sur les stations utilisées.

Tableau 1 : Informations sur les stations

Nom de la Station	Coordonnées géographiques		Chroniques	Nombre de lacunes
	Longitude (X)	Latitude (Y)		
Banfora Agriculture	-4,7667	10,6167	1991 - 2020	00
Bérégadougou	-4,7333	10,75	1991 - 2020	04
Bobo-Dioulasso	-4,32	11,17	1991 - 2020	00
Orodara	-4,9167	10,9833	1991 - 2020	03

La pluie moyenne sur le bassin versant a été obtenue par la méthode de Thiessen. Cette méthode a été privilégiée au vu du nombre de stations ayant des données disponibles (Annexe 1). En effet, il faut au moins neuf (09) stations pour utiliser le krigeage. 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. La pluie moyenne sur le bassin versant est ensuite donnée par la relation :

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

Avec $\bar{P}_{BV}$ (mm) la pluie moyenne du bassin versant 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 .

En plus de ces données, les autres données climatiques utilisées concernent l'évaporation nette (différence entre l'évaporation de la retenue et la précipitation à la surface de la retenue (SEI, 2008)) et l'évapotranspiration de référence ET_0 . Cette dernière a été calculée à partir de CLIMWAT 2.0 for CROPWAT V2.0 à l'aide de données climatiques telles que les températures minimale et maximale, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent selon l'équation suivante (Penman Monteith, 1956):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

Où :

- ET_0 : Evapotranspiration de référence ou évapotranspiration potentielle (mm/j)
- R_n : Rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m²/j)
- G : Flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m²/j)
- T : Température journalière à 2m d'altitude (°C)
- u_2 : Vitesse du vent à 2m d'altitude (m/s)
- e_s : Pression de la vapeur à saturation (kPa)
- e_a : Pression réelle de la vapeur (kPa)
- $e_s - e_a$: Déficit de la pression de vapeur à saturation (kPa)
- Δ : Pente de la courbe des pressions de vapeur (kPa/°C)
- γ : Constante psychrométrique (kPa/°C)

2.1.3. Données sur les sites de captage

Les sites de captage dans cette étude concernent les cours d'eau Comoé, Yanon et Lobi et les barrages de Moussodougou, Lobi et Toussiana. Les données nécessaires sont les débits entrants dans les trois barrages (Moussodougou, Lobi et Toussiana) qui ne sont pas connus mais qui seront estimés par la suite. Les données nécessaires à la simulation pour les barrages concernent la capacité de stockage, l'évaporation nette et les courbes caractéristiques hauteurs-volumes stockés.

2.1.4. 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). Quant aux données sur le cheptel de la zone d'étude, elles proviennent de la Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques des Cascades (DRRAH-Cas). 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 des Cascades (DRAAHA-Cas) et du Comité Local de l'Eau du bassin versant de la Haute Comoé (CLE-HC).

- **Données sur l'approvisionnement en eau potable (AEP)**

L'ONEA dispose d'un centre de traitement à Banfora qui exploite les eaux de surface du barrage de Moussodougou pour alimenter la population de Bérégadougou et Banfora. L'évaluation des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable a été effectuée sur la base des données fournies par le Service des Ressources en Eau de l'ONEA avec des hypothèses de 9 personnes par branchement particulier et 400 personnes par borne fontaine pour des consommations spécifiques de 50 l/j/hbts en milieu urbain et 25 l/j/hbts en milieu rural (Annexe 3).

- **Données sur la demande environnementale**

Il a été également pris en compte, les besoins en eau environnementaux. Les débits environnementaux sont destinés à permettre la survie des écosystèmes aquatiques. Cet apport minimal permet de maintenir l'humidité de l'air ambiant, la productivité des ressources végétales et fauniques, le ravitaillement des aquifères, et de limiter indirectement les conflits liés à l'utilisation de l'eau. Ainsi pour une gestion intégrée des ressources en eau nous avons pris en compte cette demande environnementale qui est de 0,2 m³/s au niveau de la Haute Comoé (Annexe 11).

- **Données sur l'agriculture irriguée**

L'agriculture est le plus grand usager de l'eau. Au Burkina, l'agriculture est essentiellement extensive et pluviale avec une petite partie irriguée (Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2001). Le bassin versant comporte une plaine aménageable dont le potentiel est estimé à 750 ha. La superficie actuellement aménagée est de 350 ha. L'irrigation de la plaine est faite à partir du barrage de Moussodougou. Outre ces aménagements, il existe des périmètres non formels de 2500 ha qui utilisent directement l'eau du cours d'eau et aussi l'eau du barrage pour la maraîcher-culture (AEC, 2018). Les besoins en eau des cultures ont été calculés en fonction du type de culture et de l'état végétatif de la plante à savoir : stade initial, développement, mi- saison, et enfin arrière-saison. En effet, les besoins en eau d'une plante se définissent comme la différence entre l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture considérée et les précipitations efficaces c'est à- dire la fraction des précipitations effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation profonde.

L'évapotranspiration de référence est calculée dans un premier temps à l'aide de la méthode de Penman Monteith comme indiqué plus haut. Les données utilisées pour ce calcul sont : les températures minimale et maximale, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent de la station synoptique de Bobo Dioulasso.

- **Données sur le cheptel**

Au Burkina Faso, l'élevage est la troisième source de revenus d'exportation après l'or et le coton (MEE, 2001). Dans cette zone, un élevage de type sédentaire extensif est pratiqué. Aussi, du fait des conditions climatiques favorables, des pasteurs transhumants venus des localités voisines à l'intérieur du pays comme à l'extérieur cohabitent souvent avec les éleveurs locaux. Le cheptel est composé en général de bovins, caprins, porcins et volailles. Les statistiques du secteur de l'élevage au Burkina Faso de l'année 2020 dans le bassin fournissent des informations sur le nombre de têtes par type de bétail (Annexe 4). L'utilisation des eaux de surface pour l'abreuvement du cheptel est le mode le plus répandu dans le bassin.

Les besoins en eau du cheptel dépendent entre autres de l'espèce animale, de la qualité du fourrage et du climat, et donc à cette diversité du cheptel sont associés des besoins différents en termes de consommation d'eau. Pour permettre d'avoir une base commune d'évaluation de ces besoins, il est donc important de convenir d'une unité commune de conversion appelée Unité de Bétail Tropical (UBT) propre surtout aux herbivores. Une unité de Bétail tropical correspond à un animal herbivore de 250 kg vif (www.fao.org). La considération de ce critère permet d'établir les équivalences suivantes : Bovin : 0,8 UBT ; ovin ou caprin : 0,5 UBT ; asin : 0,5 UBT et camelin : 1 UBT.

Les besoins en eau d'UBT sont alors calculés sur la base de 40 l/UBT/j. Pour les porcins et la volaille, les besoins sont estimés sur la base d'une consommation unitaire de 7 l/j pour les porcins et de 400 litres par jour pour 1000 poules. Sur la base de l'ensemble de ces considérations ci-dessus, les estimations suivantes ont été faites :

Tableau 2: Paramètres de base pour la modélisation des besoins en eau du cheptel

Comoé	2020	UBT	Consommation (l/j)	Taux d'accroissement	Consommation annuelle en m ³
Bovins	712505	0,8	40	2	22800,16
Ovins	213475	0,5	40	3	4269,5
Caprins	210029	0,5	40	3	4200,58
Porcins	55686		7	2,5	389,802
Total				2,625	31660,042

2.2. Matériel utilisé

Le traitement des données mentionnées ci-dessus a impliqué l'utilisation de divers outils de traitement, de modélisation et du Système d'Information Géographique (SIG).

2.2.1. Outils SIG

L'outil SIG ArcGIS a été utilisé pour caractériser le bassin versant et élaborer les différentes cartes en s'appuyant sur les modèles numériques de terrain de la zone d'étude.

2.2.2. 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.

2.2.3. CropWat et Climwat

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 Development (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.

CropWat utilise la pluie moyenne mensuelle dans le bassin pour le calcul de la pluie effective par la formule « Soil Conservation Service » (USDA-SCS, 2003) :

$$P_{eff} = \begin{cases} \frac{P(125 - 0,25P)}{125}, & \text{si } P \leq 225 \\ (125 + 0,1P), & \text{si } P > 225 \end{cases} \quad (3)$$

P_{eff} : représente la précipitation effective

P : représente la pluie totale.

Une fois la pluie efficace calculée, l'étape suivante consiste à sélectionner le type de sol et la culture considérée dans la base de données CropWat. Le calcul des besoins en eau s'obtient par le produit de l'évapotranspiration de référence et du coefficient cultural correspondant à chaque stade végétatif. Les valeurs obtenues sont exprimées en hauteurs d'eau (mm). Elles sont converties en volumes d'eau (m³) en les multipliant par 10 tenant compte qu'une hauteur d'eau de 1 mm équivaut à un volume de 10 m³ par hectare (10 m³/ha).

2.2.4. Modèle hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)

Le modèle hydrologique déterministe et conceptuel HEC-HMS a pendant longtemps été un modèle essentiellement appliqué à la simulation d'un événement donné. HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs sous bassins, qui sont considérés comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations.

Le modèle hydrologique HEC-HMS va nous permettre de simuler les débits à l'entrée des barrages.

2.2.5. Outil WEAP

Le modèle WEAP est un outil de planification et de gestion de l'eau développée par l'Institut de l'Environnement de Stockholm. 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 hydro climatiques 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. Il va nous permettre de modéliser le devenir des ressources en eau, la demande en eau et l'élaboration et l'analyse des scénarios tout en prenant en compte les différents changements qui peuvent survenir à l'horizon du projet.

2.3. Méthodes

2.3.1. Collecte des données

Cette étude a débuté par une revue bibliographique et a consisté principalement à la recherche et à l'exploitation des documents. Les données sont l'élément fondamental et essentiel de notre étude. Les données utilisées dans ce travail de recherche pour atteindre les objectifs fixés comprennent les données de stations météorologiques, les données sur les débits des cours d'eau, les données sur les barrages, les données du recensement de la population de la zone d'étude, les données sur les demandes en eau. Ces

données ont été obtenues auprès de quelques institutions du Burkina Faso à savoir l'Agence Nationale de la Météorologie, la Direction Générale des Ressources en Eau, l'Institut National de la Statistique et de la Démographie et du Comité Local de l'Eau du sous bassin versant de la Haute Comoé.

2.3.2. Critiques des données

- **Réorganisation des données**

Les données hydro climatiques 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 par la méthode du double cumul.

La taille des données (1991-2020) est assez longue, représentative et satisfaisante pour une analyse statistique.

- **Contrôle et comblement des données par la méthode du double cumul**

La méthode du 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 Banfora Agriculture a été choisie comme station de référence compte tenue de la continuité des données observées.

Le principe de la méthode du double cumul 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, 1986 ; Lamarque et Jourdain, 1994) (Annexe 6).

Les séries de données complétées sur la période 1991-2020 pour l'ensemble des stations, ont ensuite servi pour l'application des tests de rupture.

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

$$P_{cor} = \frac{m}{m'} * P_{ref} \quad (4)$$

Où :

P_{cor} : est la pluie moyenne annuelle corrigée ;

P_{ref} : la pluie moyenne annuelle de la station de Banfora ;

m : la pente de la portion du graphe jugé fiable ;

m' : la pente de la portion à corriger.

- **Caractérisation de la variabilité climatique**

- **Vérification de l'homogénéité climatique**

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 (Annexe 7). 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 :

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (5)$$

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

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{2(N+5)}{9N(N-1)} \quad (6)$$

➤ **Détection des ruptures**

Les pluies moyennes annuelles des différentes stations du sous bassin versant de la Haute Comoé 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, 2004). Khronostat comporte différents tests statistiques : test non paramétrique de PETTITT (Pettitt, 1979), le test de BUSHAND, l'ellipse de BOIS, la méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN et méthode de segmentation de HUBERT. 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 (Annexe 7). 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 et Claude, 1983 ; Lubes-Niel et al., 1998 ; Soro et al., 2011).

2.3.3. Présentation du modèle WEAP 21 et du modèle HEC-HMS

• **Présentation du modèle WEAP 21**

Cette étude vise à démontrer les impacts des activités anthropiques et du changement climatique sur la ressource en eau du sous bassin versant de la Haute Comoé et d'y proposer des solutions de gestion rationnelle. Ainsi l'outil utilisé pour cette modélisation est le modèle de gestion WEAP 21.

➤ **Choix du modèle**

De nombreux modèles ont été développés pour l'optimisation et la simulation des systèmes hydrographiques. On peut citer entre autres :

- ✓ **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool) est développé par des chercheurs du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA). Il permet de simuler les débits dans les cours d'eau, les composantes du cycle hydrologique et la qualité de l'eau (Winchell et al., 2013). SWAT travaille à pas de temps journaliers et exige beaucoup de données d'entrées. Il est complexe et lourd à mettre en œuvre. Son calage est délicat compte tenu du nombre important de paramètres d'ajustement. En plus SWAT fonctionne comme extension d'ArcGIS qui exige une licence pour son utilisation, bien qu'une version sous Quantum GIS (QGIS) ait été développée, appelée QSWAT.
- ✓ **Mike Hydro Basin** développé par l'Institut Hydraulique Danois (DHI) est une des applications du package Water Ressources, de la suite Mike, destiné à analyser le partage des ressources en eau au niveau des bassins hydrographiques internationaux, nationaux et locaux. Il travaille à pas de temps journaliers. Il présente beaucoup de points communs avec WEAP mais est plus coûteux et demande plus des données d'entrées (Soclo, 2010). Il fonctionne aussi comme une extension d'ArcGIS.
- ✓ **WEAP** (Water Evaluation And Planning System) a été développé par l'Institut de l'Environnement de Stockholm. Il permet une intégration transparente des processus hydrologiques des bassins d'alimentation à la gestion des ressources en eau, prend en compte les changements climatiques et également la demande.

Le choix du modèle WEAP 21 a été motivé par le fait que non seulement il est moins exigeant en données d'entrée que SWAT et Mike Hydro Basin mais il est également libre pour les étudiants et les institutions de recherche à la seule condition de s'enregistrer sur le site www.weap21.org.

A cela, on peut également ajouter le fait qu'il a été employé et validé dans l'étude de plusieurs bassins versants à travers le monde notamment au Burkina Faso. A cet effet, on peut citer l'étude de bassins versants tels que le bassin versant supérieur du Nakanbé (Ouédraogo, 2020) ; celui de la Léraba orientale (Bougma, 2020) et celui du complexe Mouhoun-Sourou (Saouto, 2016).

➤ **Approche du modèle WEAP**

WEAP est un modèle d'évaluation et de planification de l'eau axé sur la demande, les priorités et les préférences (Yates et al., 2005). Il a été développé par l'Institut de l'Environnement de Stockholm et a l'avantage d'intégrer les processus hydrologiques des bassins d'alimentation dans la gestion des ressources en eau. Il fonctionne au pas de temps mensuel et est basé sur le principe du bilan hydrique. L'utilisateur représente le système en fonction de ses diverses sources d'approvisionnement (par exemple rivières, eaux souterraines et réservoirs), des prélèvements, des demandes en eau et des besoins des écosystèmes.

Les applications WEAP comportent généralement les étapes suivantes (SEI, 2008) :

- ✓ définition du problème, y compris l'échéancier, les limites spatiales, les composantes du système et la configuration ;
- ✓ établissement des « comptes courants », qui donnent un aperçu de la demande, des ressources et des approvisionnements réels en eau du système ;
- ✓ construction des scénarios de tendances futures basées sur les politiques, le développement technologique et les changements climatiques qui affectent la demande, l'offre et l'hydrologie ;
- ✓ évaluation des scénarios en fonction de critères tels que l'adéquation des ressources en eau, les coûts, les avantages et les impacts environnementaux. Les scénarios peuvent répondre à un large éventail de questions " et si ", telles que :
 - qu'arrive-t-il si la croissance démographique et les modèles de développement économique changent ?
 - qu'arrive-t-il si les exigences des écosystèmes sont resserrées ?
 - que se passe-t-il si les techniques d'irrigation et les modèles de culture sont modifiés?
 - qu'arrive-t-il si diverses stratégies de gestion de la demande sont mises en œuvre?

Le modèle WEAP a deux fonctions principales (Yates et al., 2005) :

- ✓ simulation des processus hydrologiques naturels (évapotranspiration, ruissellement et infiltration) pour permettre d'évaluer la disponibilité de l'eau dans un bassin versant ;
- ✓ simulation d'activités anthropiques superposées au système naturel pour influencer les ressources en eau et leur répartition (c'est à dire les demandes en eau consommatrices et non consommatrices) afin de permettre l'évaluation de l'impact de l'utilisation humaine de l'eau.

- **Présentation du modèle HEC-HMS**

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été développé par le Hydrologic Engineering Center de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ...). Ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction de ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite.

Le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final. En général, dans le cas d'une modélisation événementielle, c'est l'enchaînement schématisé (Figure 8) qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit de l'exutoire :

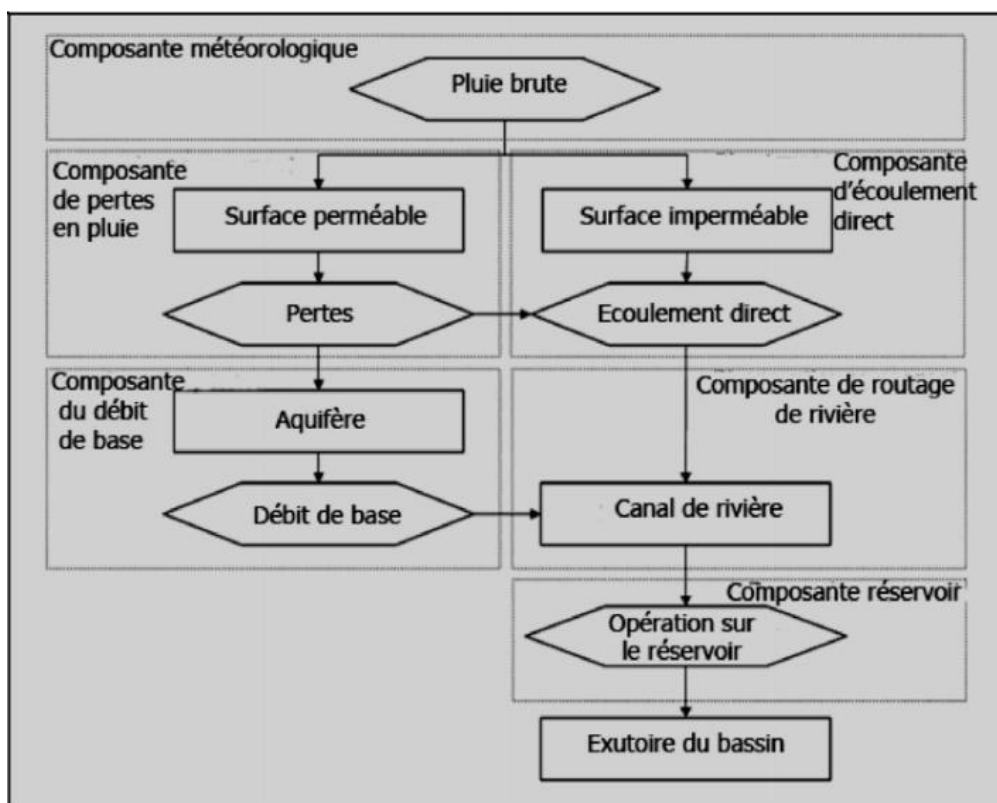


Figure 8 : L'enchaînement d'intervention des différentes composantes dans la structure événementielle du modèle HEC-HMS (Choayb, 2016)

Le module météorologique est la première composante à agir, elle vise à répartir sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace, la hauteur des précipitations brutes saisies. Ensuite, le devenir de ces précipitations diffère selon la perméabilité de la surface (Choayb, 2016):

- ✓ Pour les surfaces perméables, les précipitations brutes vont subir des pertes à la suite de phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration, ces pertes seront calculées par la composante de perte en pluie régie par la fonction de production, les précipitations nettes qui en résultent contribuent simultanément à l'écoulement direct et à l'écoulement souterrain dans l'aquifère.
- ✓ Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toute perte et rejoignent immédiatement la composante d'écoulement direct où elles se transformeront en écoulement de surface.
- ✓ Après, l'écoulement de surface et l'écoulement de subsurface provenant de la composante du débit de base, intégreront tous les deux le canal de la rivière où se manifesteront les phénomènes d'atténuation et de translation contrôlés par la composante de routage. Finalement, l'effet des constructions hydrauliques naturelles ou artificielles (réservoir, barrage, dépression, lac, ...) est déterminé par la composante du réservoir.

Sur l'ensemble des trois (03) barrages présentes dans notre sous bassin, aucune station de mesure n'est installée à l'entrée de chacune d'entre elle. Pourtant le modèle WEAP a besoin de ces données pour évaluer le remplissage de chaque barrage. Pour ce faire, le modèle hydrologique HEC-HMS a été calé et validé à la station hydrométrique de Diarabakôkô. Les précipitations, l'ETP et les débits observés sont les principales données d'entrée de ce modèle. 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 Diarabakôkô (Annexe 5).

2.3.4. Application du modèle WEAP à la zone d'étude

2.3.4.1. Définition de l'étude

L'interface du modèle WEAP contient cinq vues (schéma, données, résultats, explorateur de scénarios et notes) dont la vue schématique à partir de laquelle la zone d'étude peut être identifiée, sur la base de la carte du monde incorporée au modèle. La création de la zone d'étude a consisté, dans un premier temps, à faire un zoom sur les limites du Burkina Faso puis à ajouter la limite du sous bassin versant de la Haute Comoé. Ensuite le réseau hydrographique peut être ajouté sous fichier raster ou shapefile préalablement extrait à partir d'ArcGIS.

Après ces opérations, la suite du processus consiste à numériser les objets ou nœuds :

- cours d'eau : représentés sous forme de branches de couleur bleue ;
- réservoirs, points de prélèvement : symbolisés par un triangle de couleur verte ;
- sites de demande d'eau : en forme de point de couleur rouge.

A l'issue de la numérisation des objets (cours d'eau, sites de demande et de fourniture d'eau) l'étape suivante consiste au réglage des paramètres généraux notamment le pas de temps, la définition du compte courant qui analyse l'état actuel de l'offre et de la demande en eau dans le bassin et l'horizon temporel de l'étude. Enfin les données nécessaires pour chaque utilisateur sont entrées dans le modèle à travers un clic droit de la souris sur les emplacements des objets numérisés. La figure 9 donne la structure du modèle WEAP pour le sous bassin de la Haute Comoé.

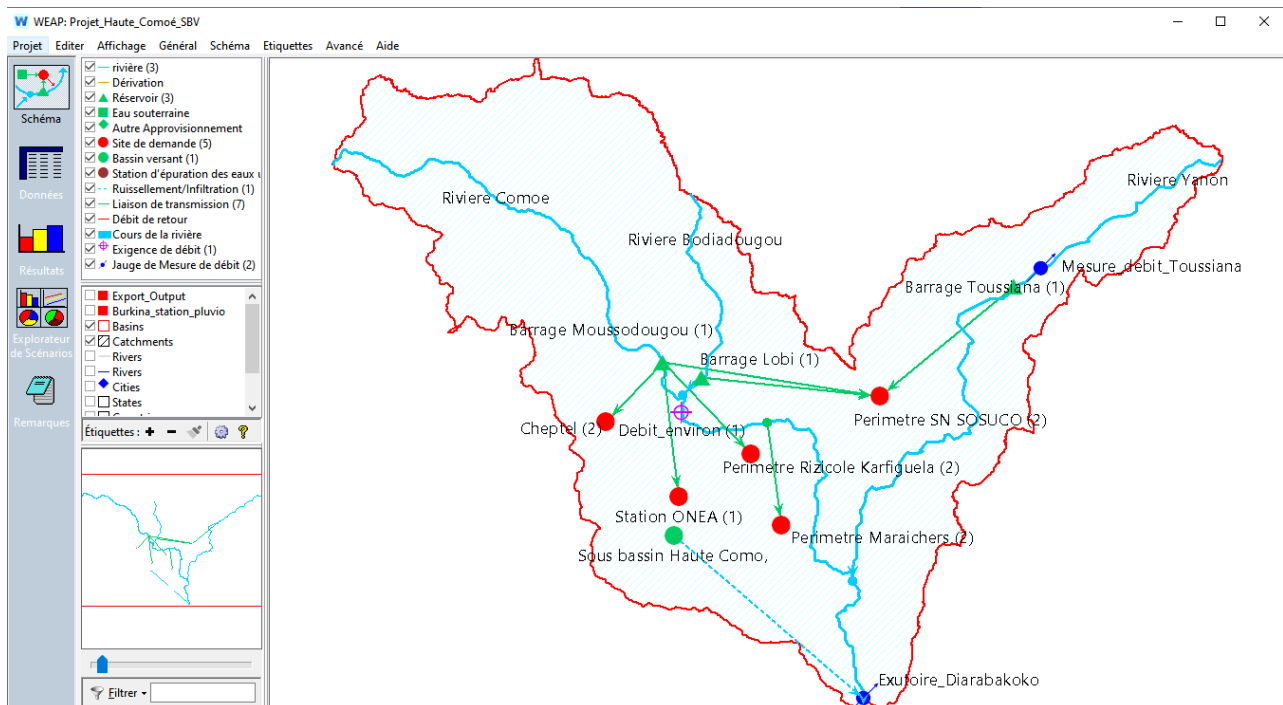


Figure 9 : Structure du modèle pour le sous bassin de la Haute Comoé

2.3.4.2. Réglage des paramètres généraux

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 2020 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.

2.3.4.3. Calage et validation du modèle WEAP

Dans cette partie, il s'agit d'adapter le modèle WEAP au sous bassin versant de la Haute Comoé. En effet, WEAP intègre cinq méthodes possibles pour l'évaluation des ressources en eau à l'échelle du bassin versant:

- **la méthode des demandes d'irrigation uniquement** : la méthode des demandes d'irrigation uniquement est la plus simple. Elle utilise les coefficients de culture pour calculer l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant, puis détermine la demande d'irrigation qui peut être nécessaire pour satisfaire la partie de l'évapotranspiration que les précipitations ne peuvent pas couvrir. Il ne simule pas les processus de ruissellement ou d'infiltration, ni ne suit les changements dans l'humidité du sol. Toute eau qui aurait pu ruisseler ou s'infiltrer est perdue dans le système.
- **le modèle pluie ruissellement**: détermine également l'évapotranspiration pour les cultures irriguées et pluviales à l'aide de coefficients de culture, comme dans la méthode de la demande d'irrigation uniquement. Le reste des précipitations non consommées par l'évapotranspiration est simulé sous forme de ruissellement vers une rivière, ou peut être réparti entre le ruissellement vers une rivière et l'écoulement vers les eaux souterraines via des liens de ruissellement/infiltration.
- **la méthode MABIA** : est une simulation quotidienne de la transpiration, de l'évaporation, des besoins et de la programmation de l'irrigation, de la croissance des cultures et des rendements.

La méthode MABIA utilise la méthode Kc "double", telle que décrite dans le document de la FAO sur l'irrigation et le drainage n° 56, selon laquelle la valeur Kc est divisée en un coefficient de culture "basal", Kcb, et une composante distincte, Ke, représentant l'évaporation à partir de la surface du sol. Le coefficient de culture basal représente les conditions réelles d'ET lorsque la surface du sol est sèche mais que l'humidité de la zone racinaire est suffisante pour permettre une transpiration complète. De cette manière, MABIA est une amélioration par rapport à CROPWAT, qui utilise une seule méthode Kc et ne sépare donc pas l'évaporation et la transpiration.

- **la méthode de la croissance des plantes** : elle simule la croissance des plantes, l'utilisation de l'eau et le rendement en utilisant un pas de temps quotidien. Elle a été développée pour fournir une méthode permettant d'étudier les impacts de la modification de la concentration atmosphérique en CO₂, du stress thermique, de la variabilité de la durée des saisons et du stress hydrique sur l'utilisation de l'eau par les plantes et le rendement des cultures. Il nécessite la spécification de paramètres qui contrôlent le taux de développement des plantes et l'utilisation de l'eau. Les routines de croissance du modèle sont basées sur l'approche adoptée dans les modèles SWAT et EPIC, ce qui permet d'utiliser leurs bases de données pour la paramétrisation du modèle. L'hydraulique de l'humidité du sol est simulée à l'aide d'un modèle à 13 couches qui représente les 3,5 mètres supérieurs du profil du sol. Les résultats du modèle comprennent le ruissellement de surface, la percolation en profondeur, l'ET des plantes, le stress hydrique et thermique, la production de biomasse et le rendement.

- **le modèle de l'humidité du sol** : est plus complexe. Elle représente le bassin versant avec deux couches de sol, ainsi que le potentiel d'accumulation de neige. Dans la couche supérieure du sol, elle simule l'évapotranspiration en tenant compte des précipitations et de l'irrigation sur les terres agricoles et non agricoles, du ruissellement et de l'écoulement superficiel, ainsi que des changements dans l'humidité du sol. Cette méthode permet de caractériser l'impact de l'utilisation des terres et/ou du type de sol sur ces processus. L'acheminement du débit de base vers la rivière et les changements d'humidité du sol sont simulés dans la couche inférieure du sol. En conséquence, la méthode de l'humidité du sol nécessite une paramétrisation plus poussée du sol et du climat pour simuler ces processus.

Pour le cas du sous bassin versant de la Haute Comoé, les données disponibles nous ont permis d'utiliser la méthode de l'humidité du sol. Il y a deux étapes dans la simulation : la première appelée calage et la seconde appelée validation. Lors du calage (1991 à 2005), on fait varier les paramètres du modèle et l'on utilise des critères de performance pour quantifier l'écart entre les débits simulés et observés et ainsi apprécier la qualité de simulation du modèle. Lors de la validation, (2006 à 2020) on simule les débits sur une période différente de celle utilisée pour le calage en utilisant le jeu de paramètres donnant le critère optimal trouvé lors de l'étape de calage. Les débits simulés lors de la validation sont alors comparés à l'observation à l'aide des critères d'évaluation. Les critères de performance calculés donnent une estimation des performances du modèle. Ces critères utilisés dans l'étude sont entre autres le critère de Nash, le pourcentage de biais noté (PBIAIS) (Dawson et al., 2007), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (ρ).

- **Critère de performance de Nash**

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

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{jobs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (7)$$

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.

- **Coefficient de corrélation (ρ)**

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

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{jsim} - \bar{Q}_{sim}) (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{jsim} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (8)$$

Ce critère mesure la Co-fluctuation des séries simulées et observées (Chaumont et Chartier, 2005). Si ρ est égal à 1 on a une corrélation parfaite entre les deux variables étudiées.

- **Le BIAIS ou erreur moyenne**

Le BIAIS est donné par la formule suivante :

$$BIAIS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - Q_{jsim})}{\bar{Q}_{obs}} * 100 \quad (9)$$

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.

- **Erreur Quadratique (RMSE)**

L'erreur quadratique moyenne :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{jsim} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

Où :

Q_{jsim} et Q_{jobs} désignent respectivement les débits simulés et observés au jour j en m^3/s .

$\bar{Q}_{sim}$ et $\bar{Q}_{obs}$ indiquent respectivement le débit moyen simulé et le débit moyen observé de la période en m^3/s .

2.3.4.4. 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 99. 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 et à la demande environnementale ; (ii) la priorité (2) correspond à la satisfaction des besoins en eau du cheptel et l’irrigation.

2.3.4.5. Elaboration des scénarios de gestion

Plusieurs changements peuvent intervenir dans le système à moyen ou long terme. Il s’agit par exemple de l’augmentation de la population du bassin, de l’accroissement des besoins en eau pour l’irrigation et autres usages, du changement climatique. Il est construit un « scénario de référence » dont le rôle est de projeter les données de l’état actuel pour toute la période de l’étude (2020-2050). Ce scénario servira de point de comparaison pour les autres scénarii « quoi si » c’est-à-dire ce qui se passerait dans le système dans le cas d’un climat variable ou d’une augmentation de la population ou encore d’un changement dans les politiques de gestion des ressources en eau du bassin.

- **Scénario d’accroissement du nombre d’abonnés de l’Office National de l’Eau**

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 du taux d’accroissement (10%) du nombre d’abonnés par rapport à la situation de référence.

Considérant la production annuelle et la population desservie par l’ONEA, un taux d’accroissement $\tau(\%)$ annuel du nombre d’abonnés a été calculé suivant la formule :

$$\tau(\%) = \left(\sqrt[n]{\frac{\text{Valeur finale}}{\text{Valeur initiale}}} - 1 \right) \times 100, \quad (11)$$

Valeur finale : population finale ;

Valeur initiale : population initiale ;

n : nombre d’années.

- **Scénario d’extension des surfaces irriguées**

Pour prendre en compte cet aspect, nous supposons une majoration des périmètres irrigués formels ainsi qu’il suit dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Extension des périmètres irrigués formels

	Années	Superficies
SN SOSUCO	2021	3000
	2031	3500
	2041	4000
Périmètre Karfiguéla	2021	350
	2031	550
	2041	750

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 contraignantes 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. Pour le calcul, nous avons utilisé CropWat. C’est un outil d’aide à l’irrigation qui intègre des paramètres comme

les coefficients culturels, le nombre de jours des différents stades végétatifs, la profondeur racinaire, etc. Pour les besoins du modèle, le début du mois de juin a été considéré comme début de la campagne pluviale et le mois de décembre comme le début du mois de contre saison (Annexe 3).

- **Scénario de changement climatique**

Le changement climatique agit sur la ressource en eau par une variation des variables climatiques (température, humidité de l'air, précipitation, vitesse du vent, évaporation, etc.). Le but de ce scénario est d'étudier la vulnérabilité de la ressource en eau face au changement climatique en comparaison avec le scénario de référence qui est supposé constant. Pour les besoins de la modélisation du bilan d'eau futur, les données nécessaires pour développer les scénarii ont été obtenues à partir du site web de KNMI Climate Explorer. Il s'agit de la pluviométrie, de la température, de l'humidité relative simulée sur la période 1850 à 2100, à l'aide du modèle climatique CMIP5 par les experts GIEC. Nous avons utilisé les coordonnées géographiques de la zone d'étude pour extraire ces données en format ASCII.

Deux scénarii climatiques ont été considérés à savoir :

- le scénario RCP4.5 qui est un scénario de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre permettant de déterminer un niveau de vulnérabilité et d'exposition des secteurs socio-économiques. C'est aussi un scénario qui fait un consensus pour l'étude du changement climatique dans la plupart des pays en Afrique de l'Ouest (Ly et al., 2019) et la plupart des bases de données climatiques disposent de manière complète toutes les informations relatives aux variables climatiques nécessaires à son analyse;
- et le scénario RCP8.5 qui est le scénario le plus extrême avec des valeurs moyennes de température pouvant atteindre 2,6 °C sur le moyen terme.

WEAP utilise les données climatiques pour modéliser le devenir des précipitations tombées dans le bassin versant. Ces données ont été corrigées par la méthode des quantiles Delta 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 (1991-2020). 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 journalières synthétisées pour chaque bassin versant durant la période de référence.

Pour les températures :

$$T_{scen} = (T_{fut} - T_{sim}) + T_{obs} \quad (12)$$

Pour les précipitations et humidité :

$$P_{scen} = \left(\frac{P_{fut}}{P_{sim}} \right) * P_{obs} \quad (13)$$

Où :

- $T(P)_{obs}$ est la température (précipitation) moyenne observée 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 simulée sur la période 2020-2050
- $T(P)_{sim}$ est la température (précipitation) moyenne sur la période de référence 1991- 2020

Le scénario de changement climatique analyse les effets de l'extension des périmètres cultivés couplé à l'augmentation de la population et des aléas climatiques sur la disponibilité de la ressource en eau.

2.3.4.6. Elaboration des scénarii d'optimisation

Dans le cas où les scénarii ci-dessus compromettent la durabilité des ressources en eau, l'exploration de scénarii d'optimisation ou d'adaptation s'impose afin de garantir une sécurité de l'eau à tous les usagers. Cela peut passer par des actions de sensibilisation des acteurs sur de bonnes pratiques d'utilisation de l'eau, l'entretien des ouvrages hydro-agricoles, le recours à de nouvelles sources d'approvisionnement, ou encore l'adoption de nouvelles techniques agricoles comme l'irrigation goutte à goutte ou par l'irrigation par aspersion.

- **Scénario de nouvelle technique d'irrigation**

Dans le cas où les différents scénarii proposés ne garantissent pas la durabilité des ressources en eau, des recours à de nouvelles technologies ou approches pour préserver ou minimiser les pertes en eau s'avèrent nécessaire. Dans ce scénario 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 sous bassin versant de la Haute Comoé, l'irrigation gravitaire est la plus utilisée sur les périmètres irrigués règlementaires et parfois à travers les motopompes pour les exploitants anarchiques. A la plaine de Karfiguéla par exemple c'est le système gravitaire qui est utilisé pour les aménagements. 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 peuvent atteindre 90% ou plus contre 50 à 70% pour l'irrigation gravitaire. Le scénario « nouvelle technologie agricole » suppose qu'à partir de 2030, le périmètre de Karfiguéla passera au système d'irrigation par aspersion ou goutte à goutte tandis que le périmètre des maraichers passera au système gravitaire.

- **Scénario de nouvelles sources d'eau pour l'approvisionnement en eau**

L'évaluation des ressources en eau souterraine des nappes profondes et superficielles du sous bassin de la Haute Comoé a été réalisée en 1997 par le Programme de Valorisation des Ressources en Eau du Sud-Ouest du Burkina Faso (Programme RESO, 1998) et l'évaluation de celle de la nappe alluviale de Karfiguéla a été réalisée en 2013 par le Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI) et plus précisément par sa composante « Gestion Durable des Eaux Souterraines pour l'Agriculture Irriguée » (PADI-BF 101, 2013). La plaine alluviale occupe une superficie de 4580 hectares soit 45 800 000 m², avec une épaisseur moyenne saturée de 26,88 m, une évaporation annuelle de 2 m et un coefficient d'emmagasinement moyen de 0,14 %. L'analyse granulométrique a montré qu'environ 30% de la plaine alluviale est constituée de gravier et de l'arène sableuse. Ces formations renferment surtout les ressources facilement exploitables ce qui nous permet d'évaluer les réserves à 48 000 000 de m³. Si nous considérons une réserve de crise de 10% de la réserve totale, nous obtenons une réserve exploitable de 43 200 000 m³/an (AEC, 2018). Ce scénario explore le recours aux eaux souterraines pour les besoins en eau du cheptel ainsi que pour l'approvisionnement en eau potable des populations à travers la réalisation de forages à gros débit ($\geq 5 \text{ m}^3/\text{h}$) afin de satisfaire les besoins en eau de ces différentes activités à 100 % d'ici 2050.

Conclusion

L'élaboration de tous ces scénarios nous ont permis à travers le modèle WEAP d'effectuer des simulations à l'horizon 2050 tandis que le modèle HEC-HMS nous a permis de déterminer les débits entrant dans les trois (03) barrages. Ces débits ont permis au modèle WEAP d'évaluer le niveau de remplissage des barrages. Les résultats obtenus seront interprétés puis analysés. Le chapitre suivant sera donc consacré à l'analyse et la discussion des résultats de simulation.

Chapitre 3 : Résultats et discussions

En prenant en compte les données de débits, du climat, les usages de l'eau et l'occupation des terres, différents scénarii ont été construits pour caractériser le devenir des ressources en eau du bassin de la Haute Comoé à l'horizon 2050 dans les conditions d'un climat constant ou variable, d'un accroissement de la population et des superficies cultivables. Le modèle WEAP 21 a été utilisé pour les différentes simulations.

3.1. Ressources en eau disponibles dans le sous bassin versant

Le bassin versant de la Comoé compte de nombreuses retenues d'eau dont vingt (20) lacs et mares, et vingt-sept (27) barrages mobilisant au total 114,6 millions de m³. Quatre de ces retenues sont suivies sur le plan hydrologique. Le volume moyen interannuel stocké par ces retenues suivies est d'environ 56,8 millions de m³ soit 50 % du volume total de toutes les retenues du bassin versant (Ministère de l'environnement et de l'Eau - IWACO, 2000). Parmi ces ouvrages le barrage de Moussodougou, qui est la plus importante en termes de capacité de stockage avec 38 millions de m³, est actuellement exploité pour l'approvisionnement en eau potable (AEP) des villes de Banfora et Bérégadougou par l'ONEA. Au regard de l'importance des activités menées autour des barrages, trois d'entre elles ont été choisies pour l'évaluation du niveau de satisfaction des besoins en eau des usagers actuels et futures.

3.2. Calage du modèle HEC-HMS

Les résultats obtenus sur la période 1991-2020 (calage : 1991-2005 et validation : 2006-2020) ont été comparés avec les débits observés à la station de Diarabakôkô (Figure 10 et 11). Après la modification des paramètres physiques, l'hydrogramme simulé reproduit assez fidèlement l'hydrogramme des débits observés en calage et à la validation. Cependant les débits de pointe sont sous-estimés. Les critères de performance obtenus au calage et à la validation sont indiqués dans le tableau 5. Ces critères nous ont permis de retenir des valeurs de paramètres physiques du sous bassin d'étude (Annexe 5).

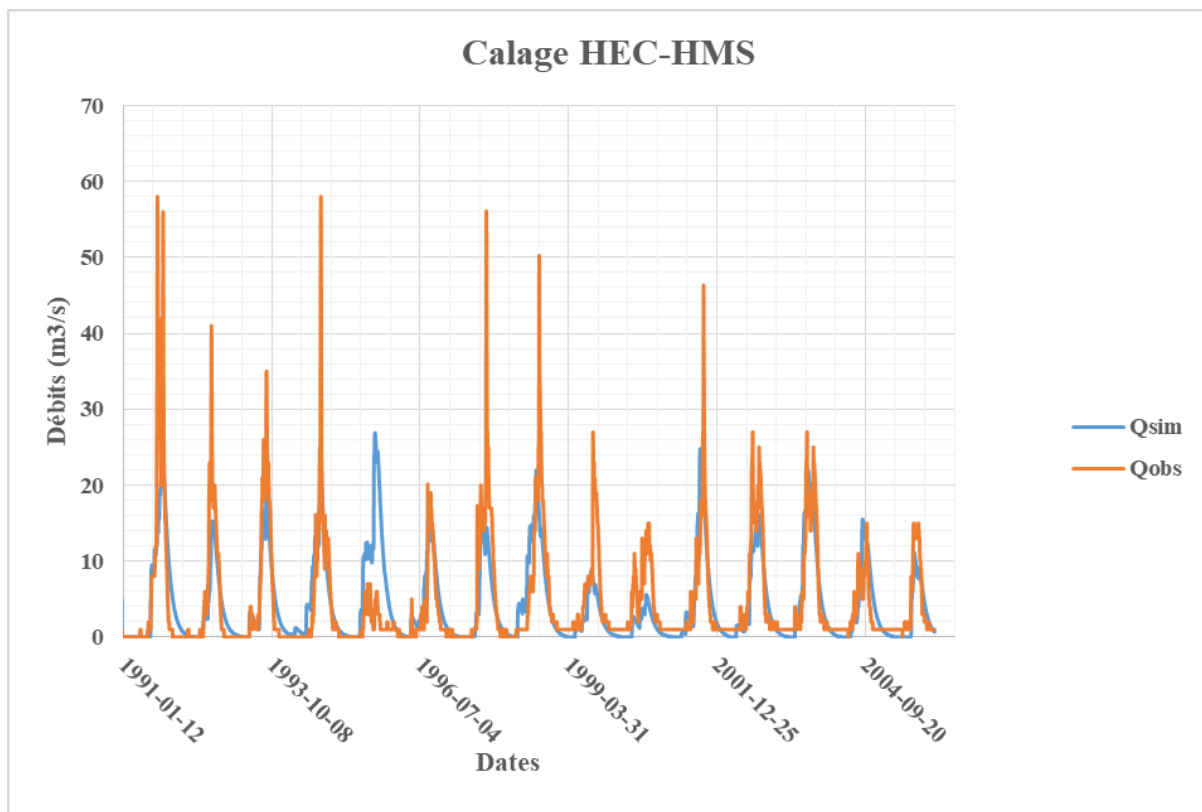


Figure 10 : Hydrogramme des débits simulés et observés sur la période de calage avec HEC-HMS

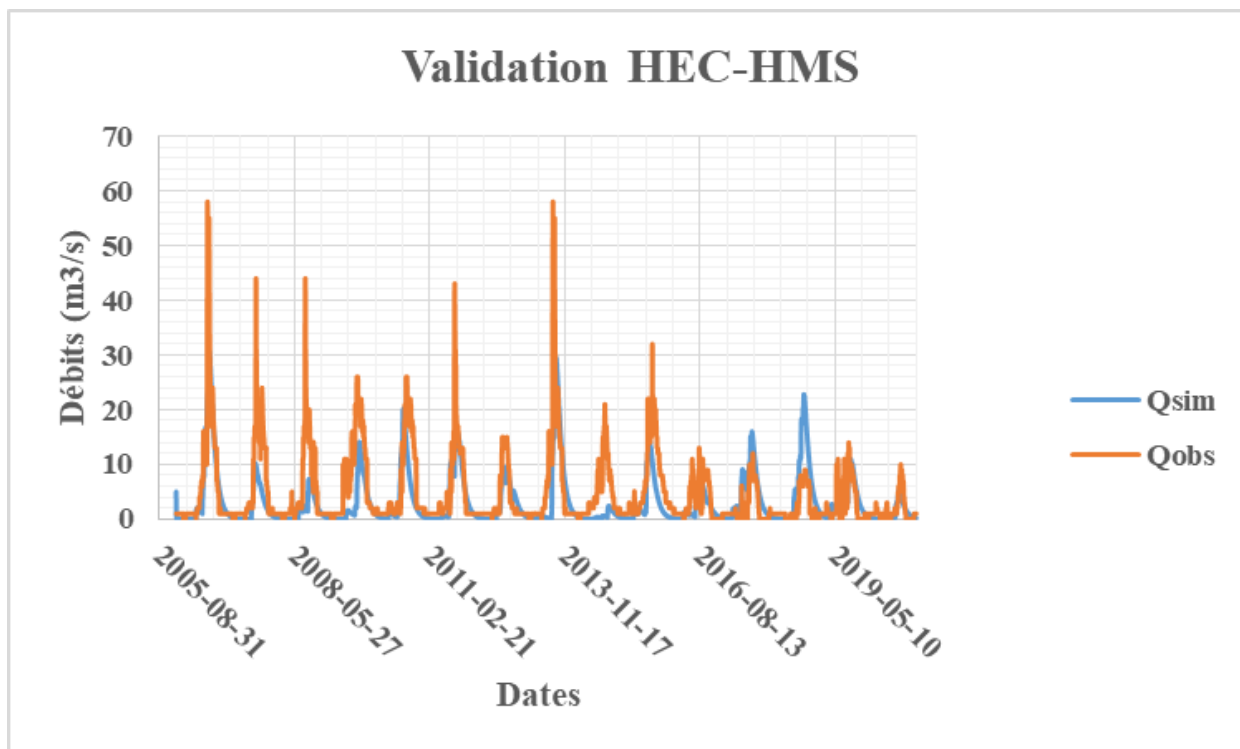


Figure 11 : Hydrogramme des débits simulés et observés sur la période de validation avec HEC-HMS

Tableau 4 : Bilan de l'eau au calage et à la validation avec HEC-HMS

	Précipitations		Ruissellement Simulé		Ruissellement Observé		ETR		Variation de stock		Critère du bilan
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	
Calage (1991-2005)	491,56	100	35,58	7,23	38,20	7,77	455,95	92,71	0,032	0,0065	0,93
Validation (2006-2020)	490,86	100	25,27	5,14	37,65	7,67	465,58	94,84	0,009	0,0018	0,67

Tableau 5 : Critères de performance au calage et à la validation avec HEC-HMS

Critères de performance	Calage	Validation	Valeur de référence
Nash	0,738	0,693	>0,5
PBIAIS	2,5%	2,9%	-25%<PBIAIS<25%
RMSE	4,7	5	>0,7

Le Nash étant supérieur à 0,7 pour le calage et supérieur à 0,6 pour la validation, alors on peut conclure que le modèle arrive à bien simulé la variabilité des débits au niveau du bassin aussi bien pour le calage que pour la validation.

Le critère du Bilan étant inférieur à 1 aussi bien pour le calage que pour la validation, alors on peut dire que le modèle sous-estime les débits simulés au niveau du bassin.

Les coefficients de ruissellement observé et simulé étant proches pour le calage (7,23 et 7,77) et de même pour la validation (5,14 et 7,67), alors le modèle simule bien les données observées. Aussi, le coefficient de ruissellement observé étant supérieur au coefficient de ruissellement simulé pour le calage (7,77 > 7,23) et de même pour la validation (7,67 > 5,14), alors cela confirme le fait que le modèle sous-estime les débits simulés

3.3. Calage et validation du modèle WEAP 21

Les figures 12 et 13 comparent les débits observés et simulés à l'exutoire du bassin versant sur la période 1991-2020 (Calage : 1991-2005 et validation : 2006-2020). L'étude de la performance du modèle à partir des critères de performance (Nash, PBIAIS et RMSE) dont les résultats sont consignés dans le Tableau 6 est jugée satisfaisante et confirme l'observation visuelle des courbes de débits observés et simulés. En effet, selon (Moriassi et al., 2007), un modèle de simulation est jugé satisfaisant si Nash > 50% ; PBIAIS < $\pm 25\%$ et RMSE > 0,7.

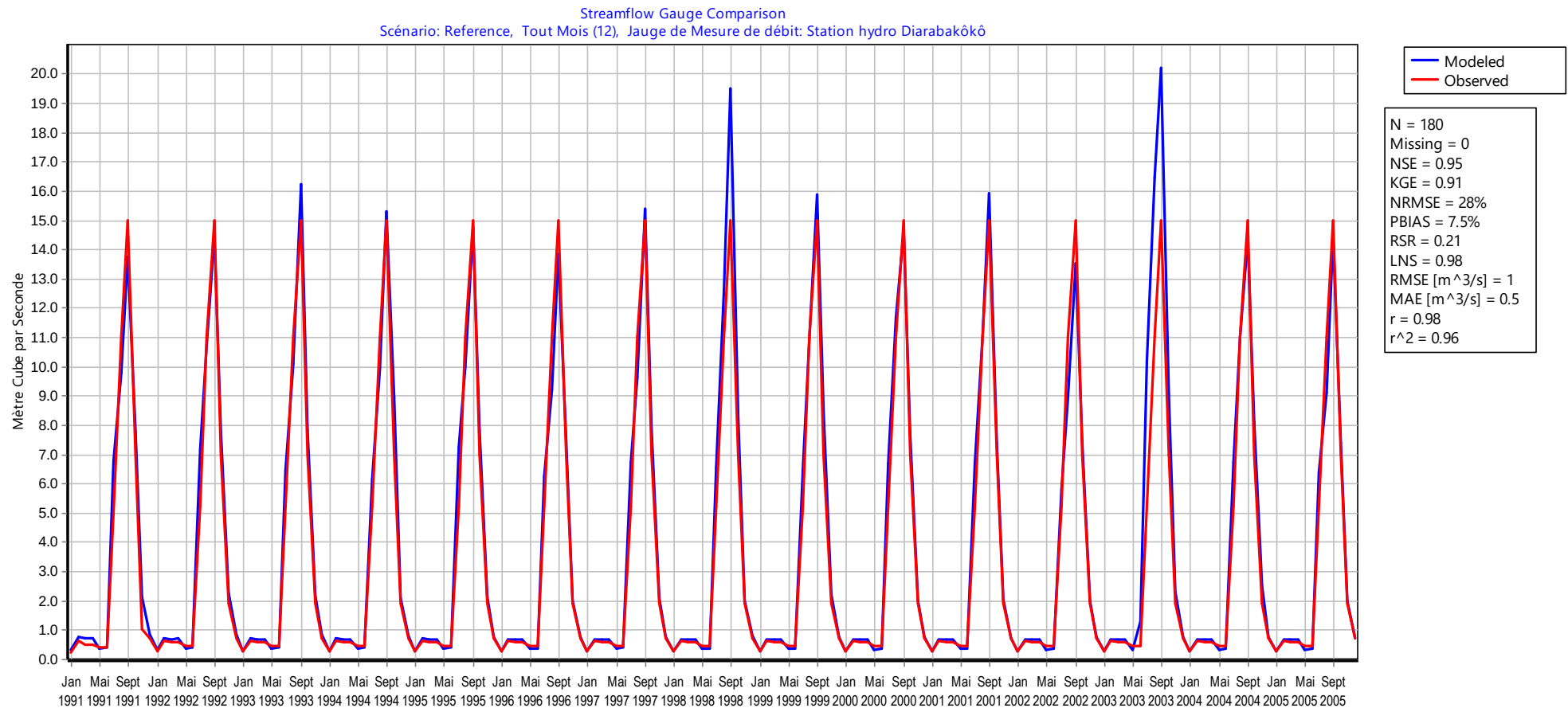


Figure 12 : Hydrogramme des débits observés et simulés sur la période de calage avec WEAP 21 (1991 à 2005)

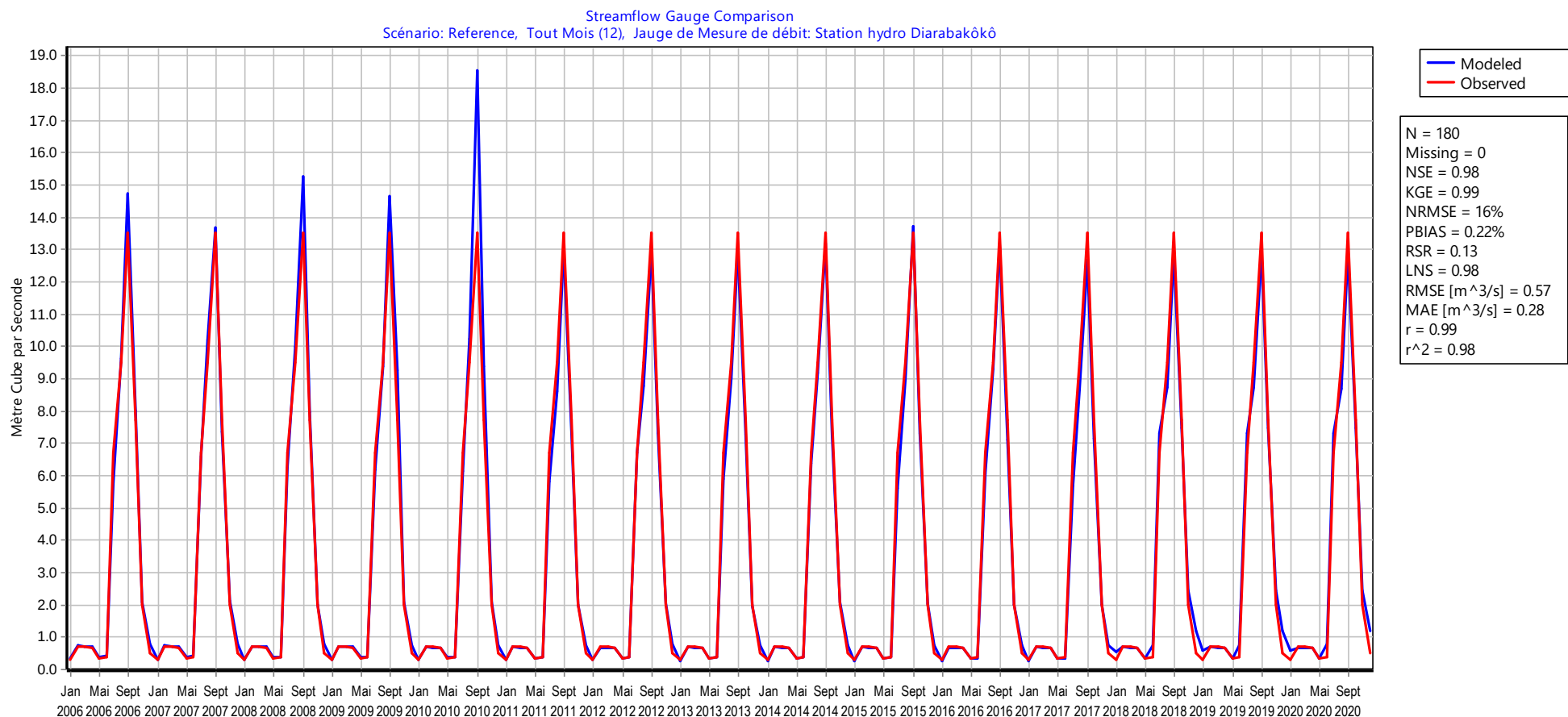


Figure 13 : Hydrogramme des débits observés et simulés sur la période de validation avec WEAP 21 (2006 à 2020)

Ces courbes ont été obtenues après ajustement des paramètres du modèle que sont « la couche supérieure du sol », « la direction privilégiée de l'écoulement », « le facteur de résistance au ruissellement » et « la zone de conductivité racinaire » (Annexe 13). Le tableau 6 récapitule les valeurs des différents critères d'évaluation de la performance du modèle.

Tableau 6: Critères de performance au calage et à la validation avec HEC-HMS

Critères de performance	Calage	Validation	Valeur de référence
RMSE	1	0,57	>0,7
Nash	0,95	0,98	>0,5
PBIAIS	7,5%	0,22%	-25%<PBIAIS<25%

3.4. Situation actuelle de l'offre et de la demande dans le sous bassin versant : scenario de référence

La Figure 15 présente la situation actuelle des besoins en eau pour chaque site de demande dans le bassin. La demande totale dans le bassin ainsi estimée s'élève à environ 55,71 millions de m³ dont 91,77% pour les besoins de l'agriculture irriguée, 0,1% pour le cheptel, 2,49% pour l'approvisionnement en eau potable et 5,64% pour la demande environnementale. Face à cette demande seuls les besoins pour l'approvisionnement en eau potable sont satisfaits toute l'année en raison de la priorité accordée à ce secteur. Les autres usages connaissent des déficits notamment en saison sèche et spécifiquement durant les mois de Février-Mars-Avril-Mai (Figure 16). Ces déficits sont probablement consécutifs à la baisse des écoulements dans les cours d'eau à partir desquels bon nombre de périmètres sont directement connectés mais aussi à la baisse du niveau de l'eau dans le barrage de la Comoé qui approvisionne environ 5700 ha de superficies emblavées dont près de la moitié en saison sèche.

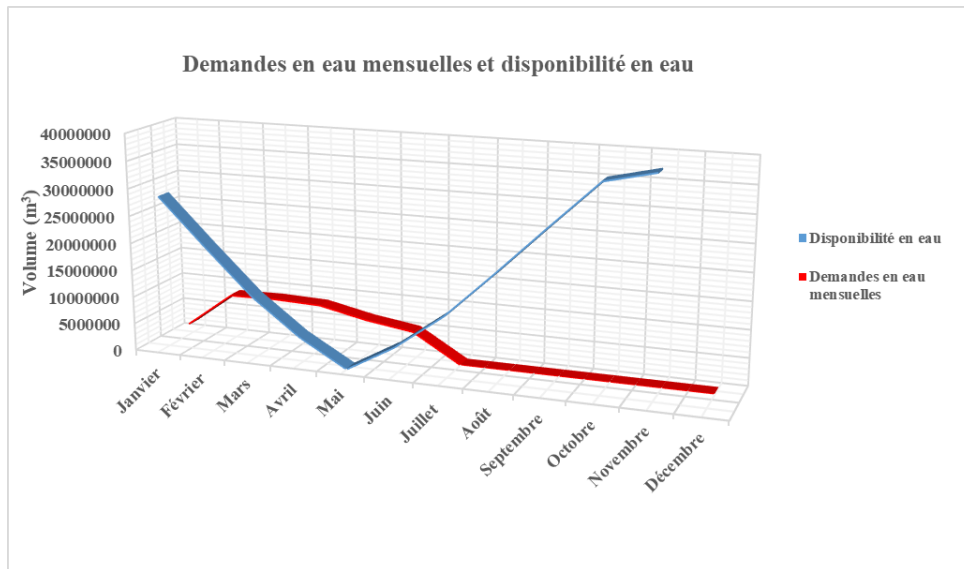


Figure 14 : Courbes des demandes et disponibilité en eau mensuelles

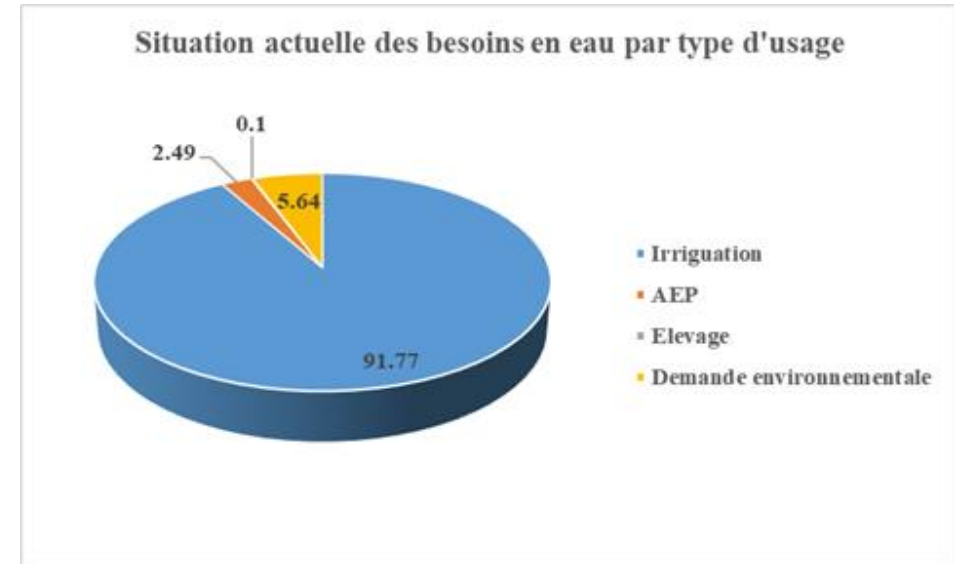


Figure 15: Répartition des besoins en eau annuels dans le bassin par type d'usage

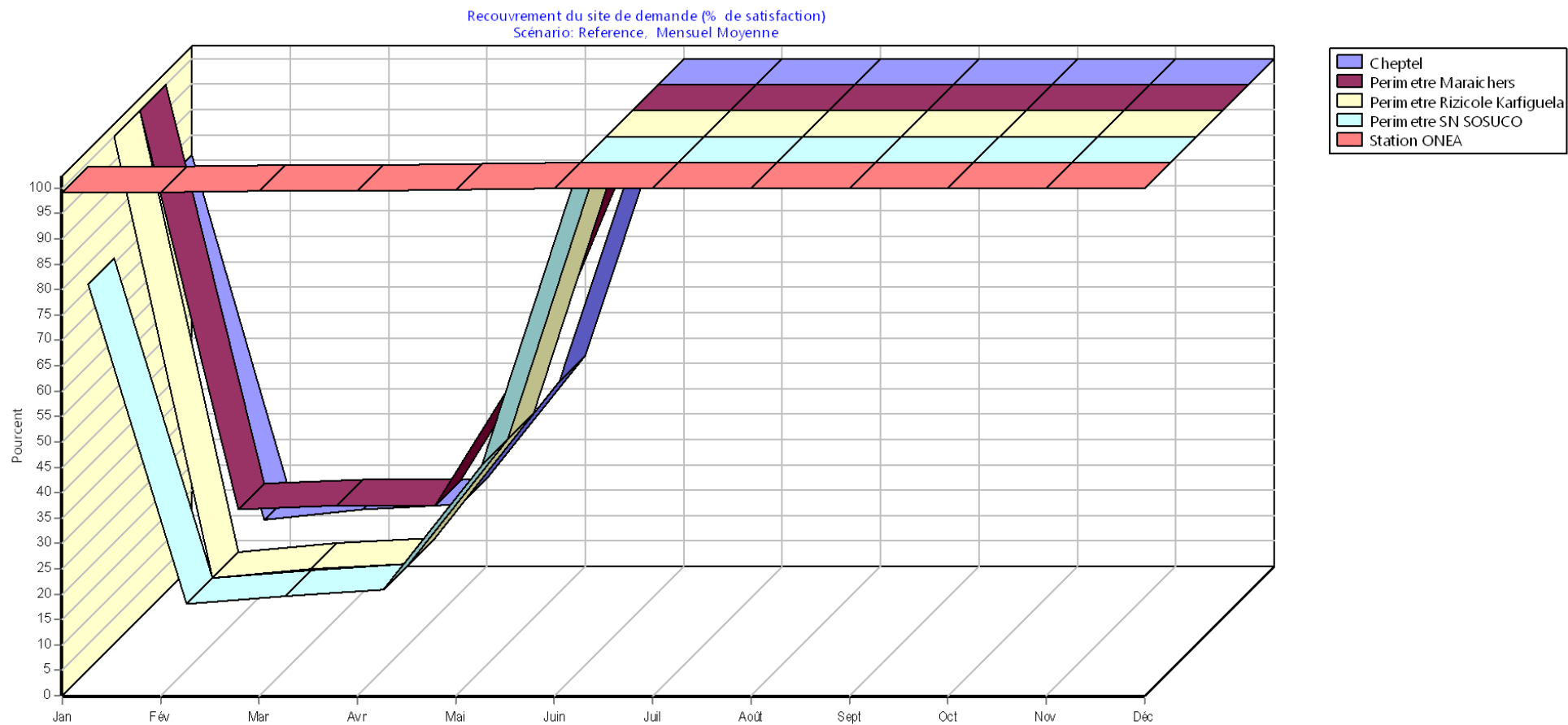


Figure 16 : Taux de satisfaction des besoins en eau des usagers en 2020

En supposant que sur la période 2020-2050, les conditions climatiques restent similaires à celles de l'année de base (2020) et que le nombre d'utilisateurs ne varie pas, l'analyse du niveau de satisfaction de la demande en eau fait ressortir que seuls les besoins en eau pour l'AEP et le cheptel sont couverts. Les autres besoins connaîtront des déficits allant de 2 millions m³ par an pour le périmètre de Karfiguéla à 26 millions m³ par an pour le périmètre de la SN SOSUCO (Figure 17).

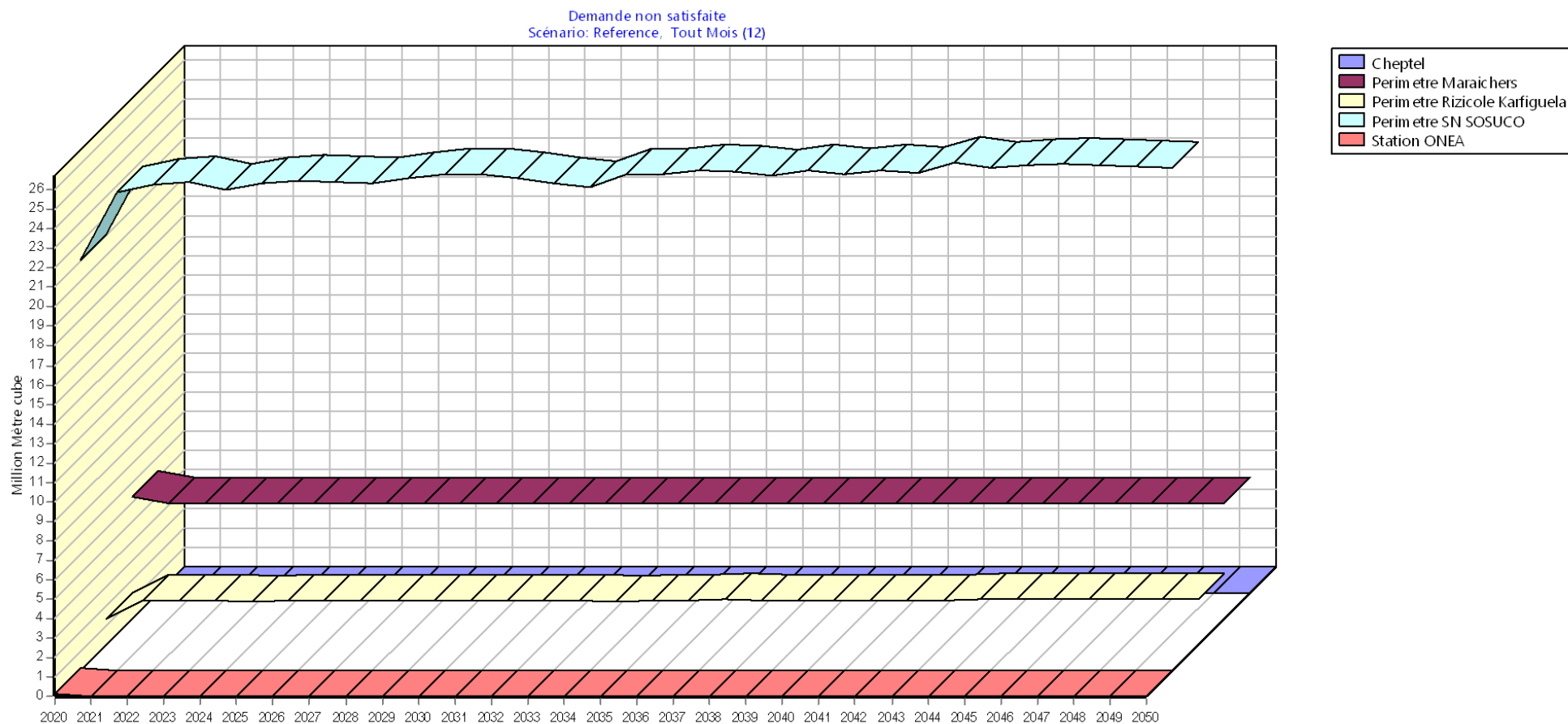


Figure 17 : Demande en eau non satisfaite des usagers sur la période 2020-2050 si le climat est pareil qu'en 2020

Le déficit pour l'irrigation se fait beaucoup ressentir pendant les mois de Février-Mars-Avril-Mai. A cette période de l'année, les barrages sont généralement à leur niveau les plus bas alors que la saison pluvieuse ne s'est pas encore installée (Figure 18).

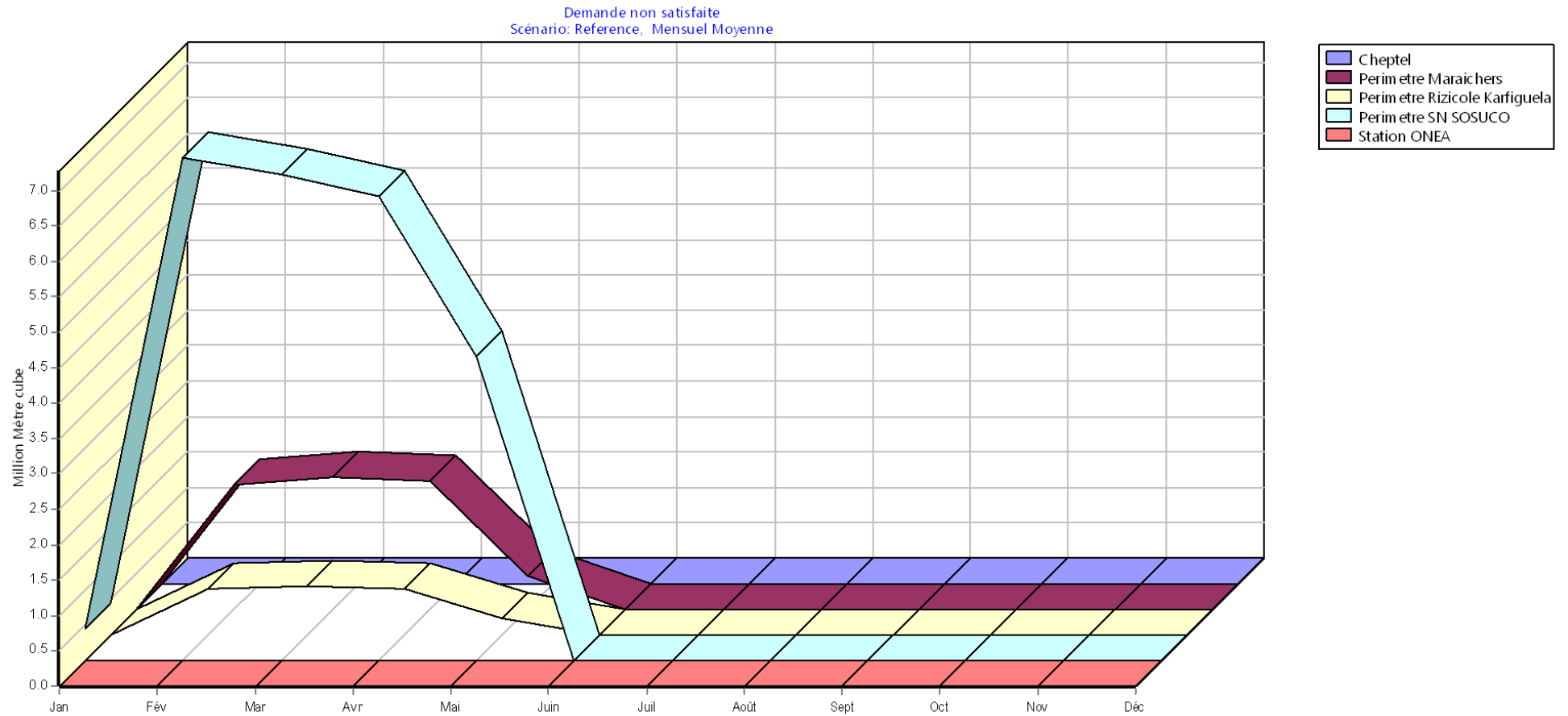


Figure 18 : Demande en eau mensuelle non satisfaite sur la période 2020-2050 si le climat est pareil qu'en 2020

3.5. Elaboration des scénarios de gestion

3.5.1. Scénario d'augmentation du nombre d'abonnés de l'Office National de l'Eau

Ce scénario suppose une augmentation du taux d'accroissement de la population desservie par le réseau ONEA de 10% 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 2043, les ressources en eau disponibles pourront supporter la demande en eau. En revanche à partir de 2043, les analyses indiquent des risques que le barrage de Moussodougou ne permettra plus de couvrir les besoins en eau des usagers. Les déficits de couverture vont de 0,14 million de m³ en 2043 à 1,57 millions de m³ en 2050 (Figure 20).

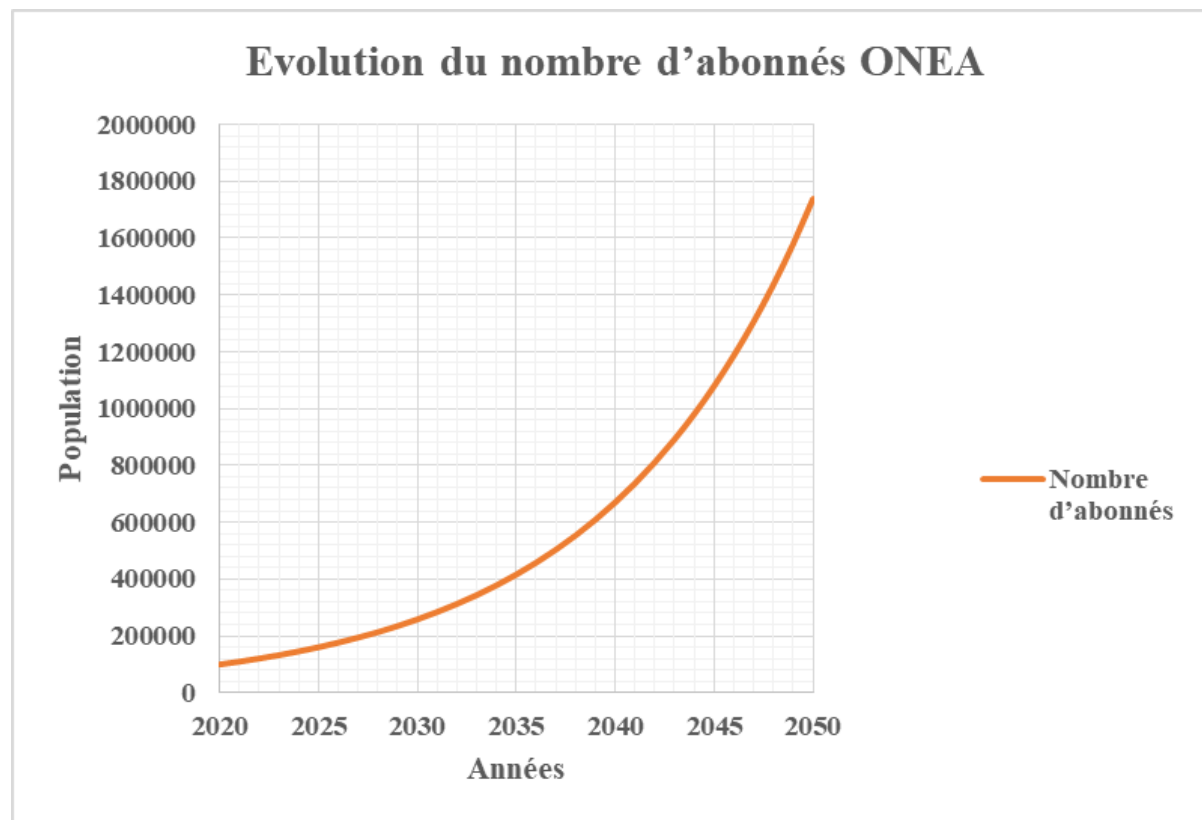


Figure 19 : Courbe d'évolution du nombre d'abonnés au réseau ONEA à l'horizon 2050

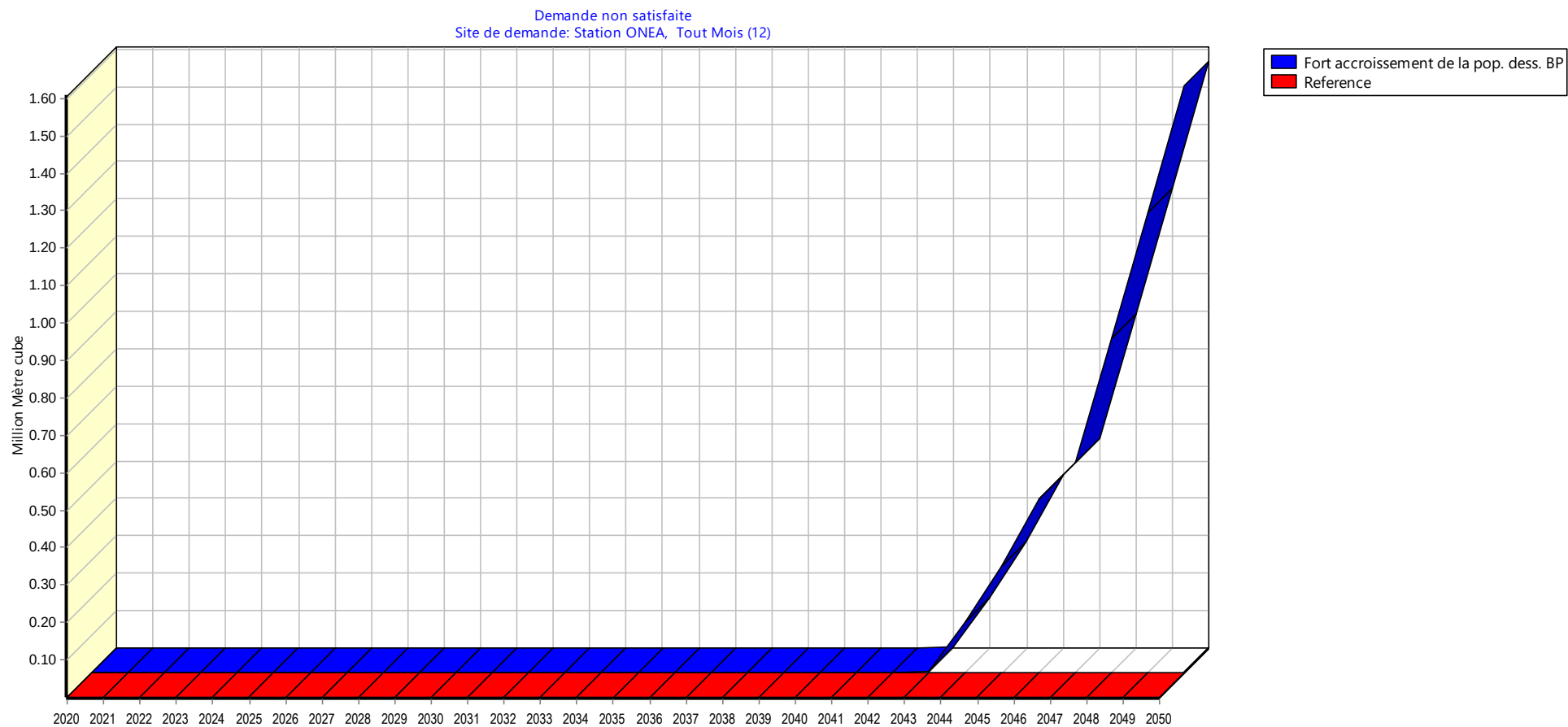


Figure 20 : Demande en eau non satisfaite suite à l'augmentation du nombre d'abonnés au réseau ONEA à l'horizon 2050 si le climat est pareil qu'en 2020

3.5.2. Scenario d'extension des surfaces irriguées

L'un des objectifs de ce travail vise la proposition d'une gestion rationnelle de la ressource en eau. Pour y arriver, il est important de savoir à quelle période de l'année les besoins en eau ne sont plus couverts dans le cas d'une augmentation des surfaces irriguées. La figure 22 présente la demande en eau non satisfaite pour les usagers dans un climat constant jusqu'en 2050 (situation de référence). Cette figure montre non seulement des difficultés de satisfaction² des besoins en eau mais également l'accroissement de ces besoins. La demande en eau non satisfaite va passer de 29 millions de m³ en 2020 à 51 millions de m³ en 2050 soit une augmentation de 75,86%. La figure 23 montre que ces déficits seront observés pendant les mois de février, mars, avril et mai où le barrage manque suffisamment d'eau.

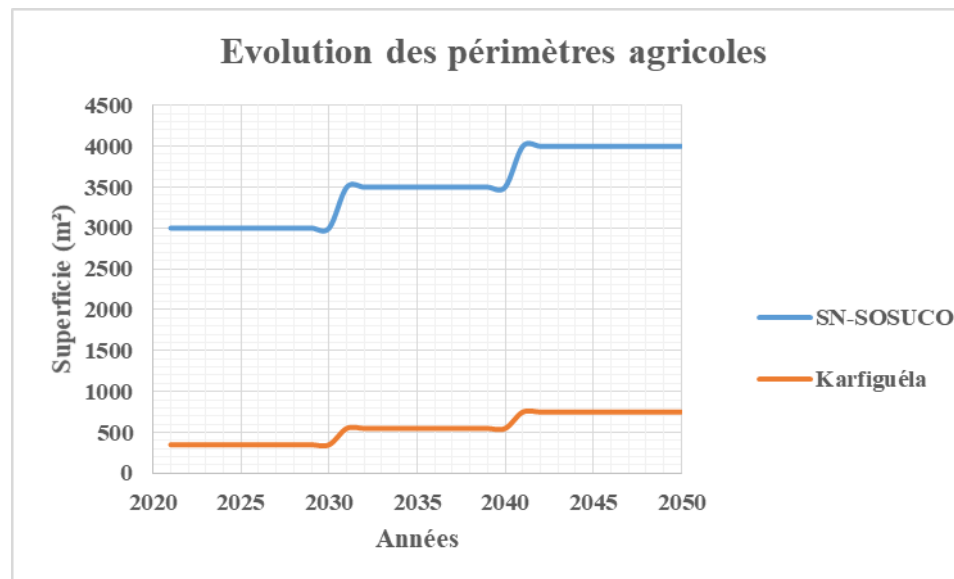


Figure 21 : Courbe d'évolution des périmètres agricoles à l'horizon 2050

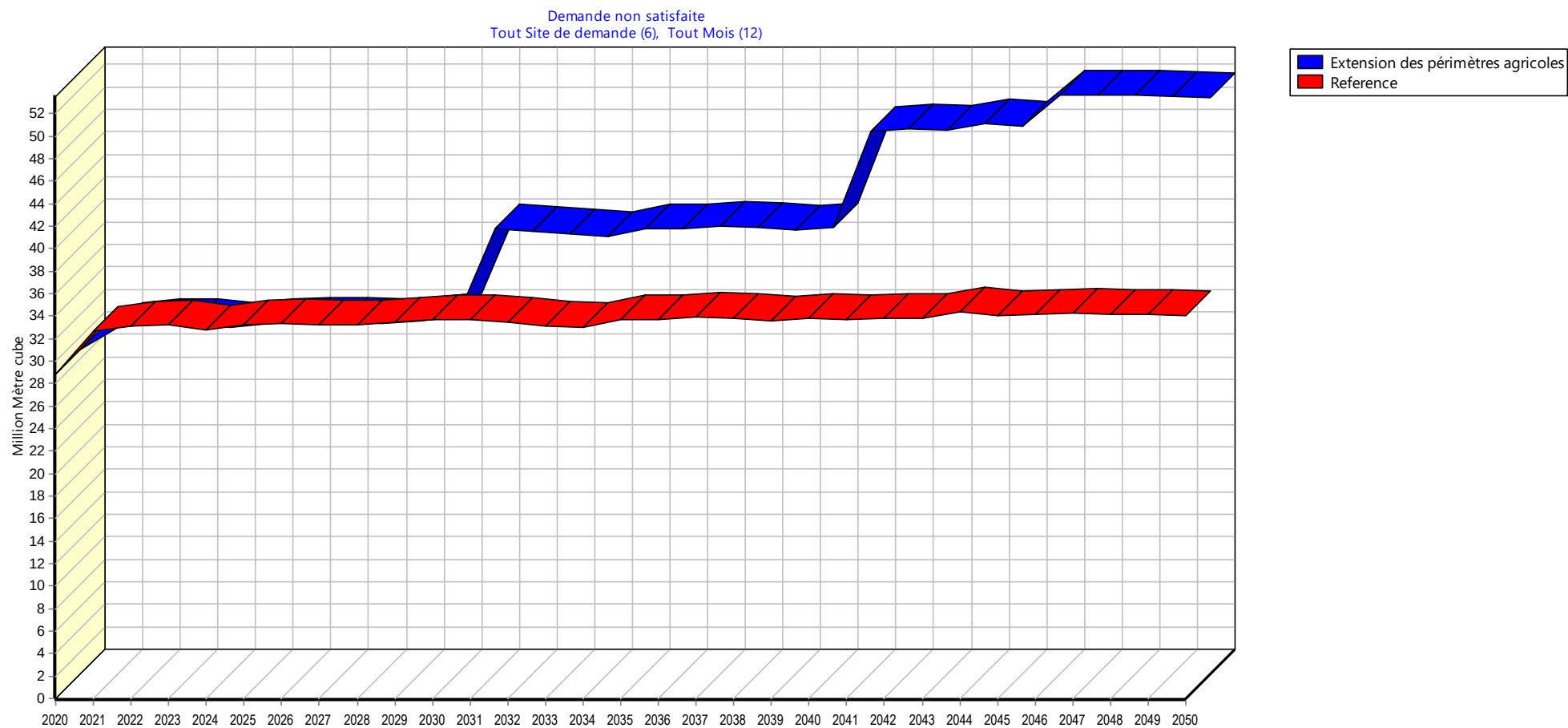


Figure 22 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario d'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050 si le climat est pareil qu'en 2020

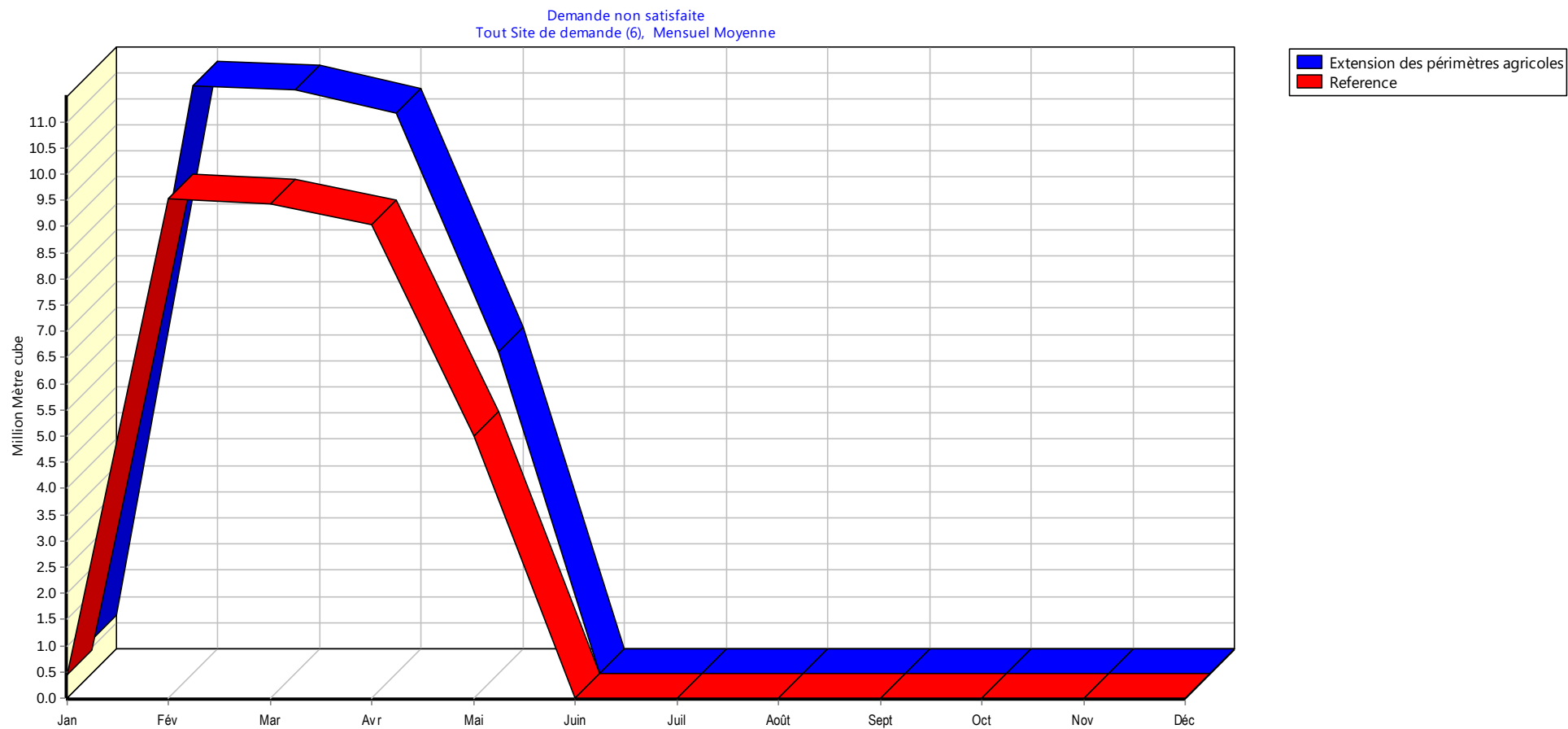


Figure 23 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant le scénario d’extension des périmètres agricoles à l’horizon 2050 si le climat est pareil qu’en 2020

3.5.3. Scénario de changement climatique

3.5.3.2. Correction de biais par la méthode des quantiles Delta Mapping

- Scénario RCP8.5

Les figures 24 et 25 comparent les précipitations/ températures historiques non corrigées, observés et corrigées sur la période 1991-2020. L'étude de la performance du modèle à partir des critères de performance (Nash, PBIAIS et RMSE) dont les résultats sont consignés dans le Tableau 7 est jugée satisfaisante et confirme l'observation visuelle des courbes de débits observés et simulés. En effet, selon (Moriassi et al., 2007), un modèle de simulation est jugé satisfaisant si $Nash > 50\%$; $PBIAIS < \pm 25\%$ et $RMSE > 0,7$

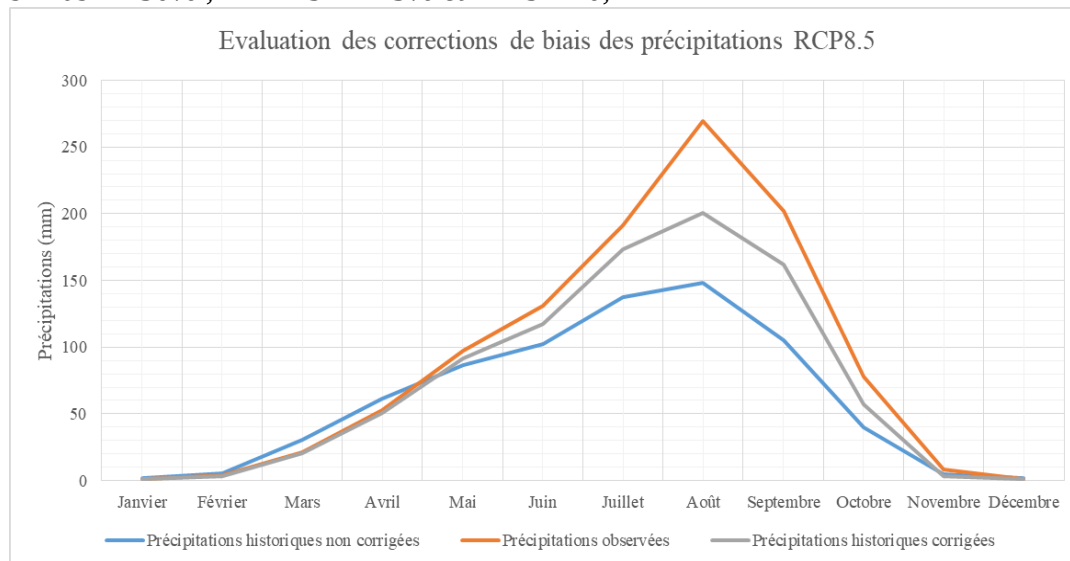


Figure 25 : Evaluation des corrections de biais des données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP8.5

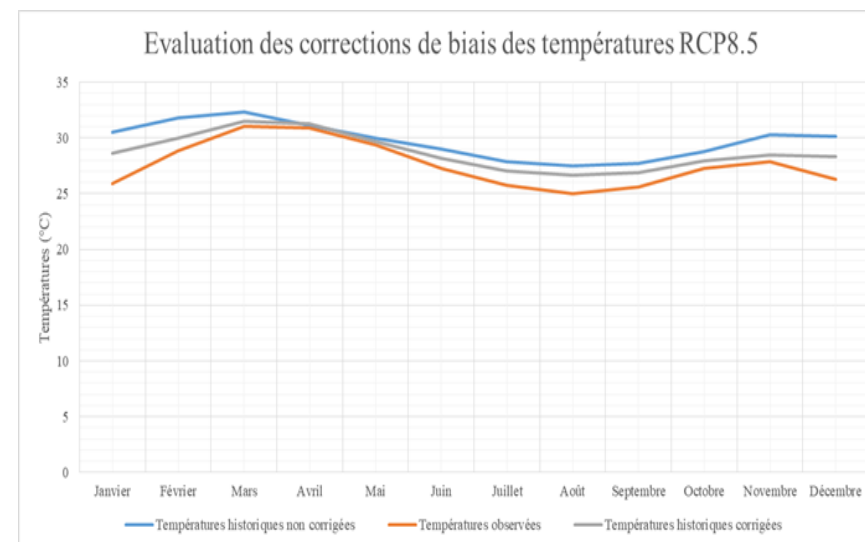


Figure 24 : Evaluation des corrections de biais des données de températures par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP8.5

Tableau 7: Critères de performance du modèle climatique suivant le scénario RCP8.5

Critères de performance	RCP8.5		Valeur de référence
	Précipitations	Températures	
RMSE	72,19	3,41	$>0,7$
Nash	0,92	0,79	$>0,5$
PBIAIS	16,43%	-3,93%	$-25\% < PBIAIS < 25\%$

- **Scénario RCP4.5**

Les figures 26 et 27 comparent les précipitations/ températures historiques non corrigées, observés et corrigés sur la période 1991-2020. L'étude de la performance du modèle à partir des critères de performance (Nash, PBIAIS et RMSE) dont les résultats sont consignés dans le Tableau 8 est jugée satisfaisante et confirme l'observation visuelle des courbes de débits observés et simulés. En effet, selon (Moriassi et al., 2007), un modèle de simulation est jugé satisfaisant si Nash > 50% ; PBIAIS < ±25% et RMSE > 0,7

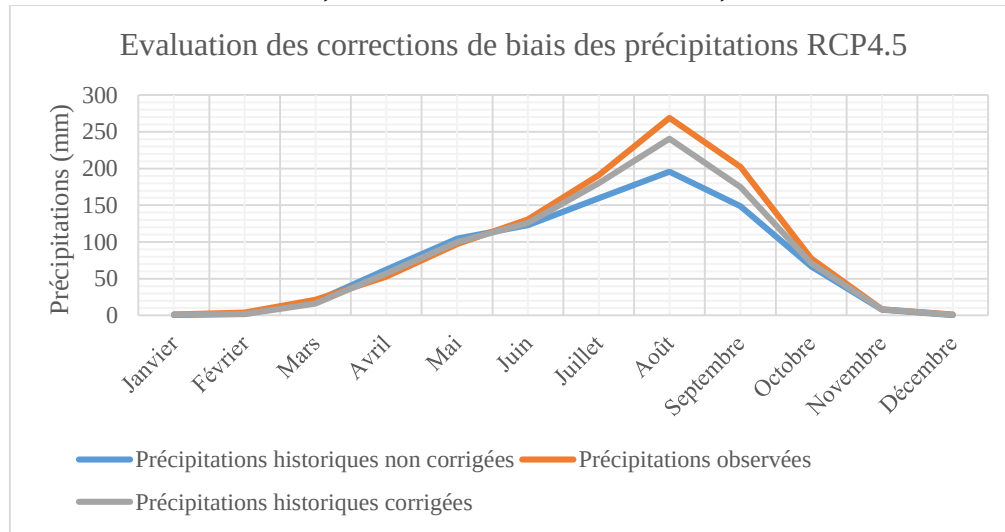


Figure 27 : Evaluation des corrections de biais de données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP4.5

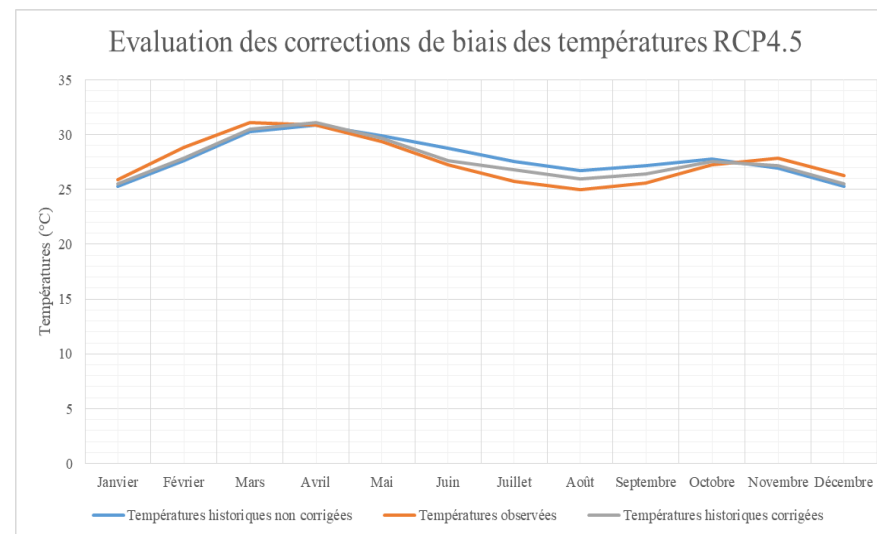


Figure 26 : Evaluation des corrections de biais de données de précipitations par la méthode des quantiles Delta Mapping suivant le scénario RCP4.5

Tableau 8: Critères de performance du modèle climatique suivant le scénario RCP4.5

Critères de performance	RCP4.5		Valeur de référence
	Précipitations	Températures	
RMSE	79,72	2,72	>0,7
Nash	0,98	0,93	>0,5
PBIAIS	7,51%	-0,20%	-25%<PBIAIS<25%

3.5.3.1. Scénarios RCP4.5 et RCP8.5

En considérant le seul effet du changement climatique (scénario RCP8.5 et RCP4.5 du modèle CMIP5), nous constatons une augmentation de la demande non satisfaite allant de 34 millions de m³ pour la situation de référence à 37 et 41 millions pour respectivement les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (figure 28). Ces augmentations montrent à quel point les effets du changement climatique impactent considérablement la ressource en eau.

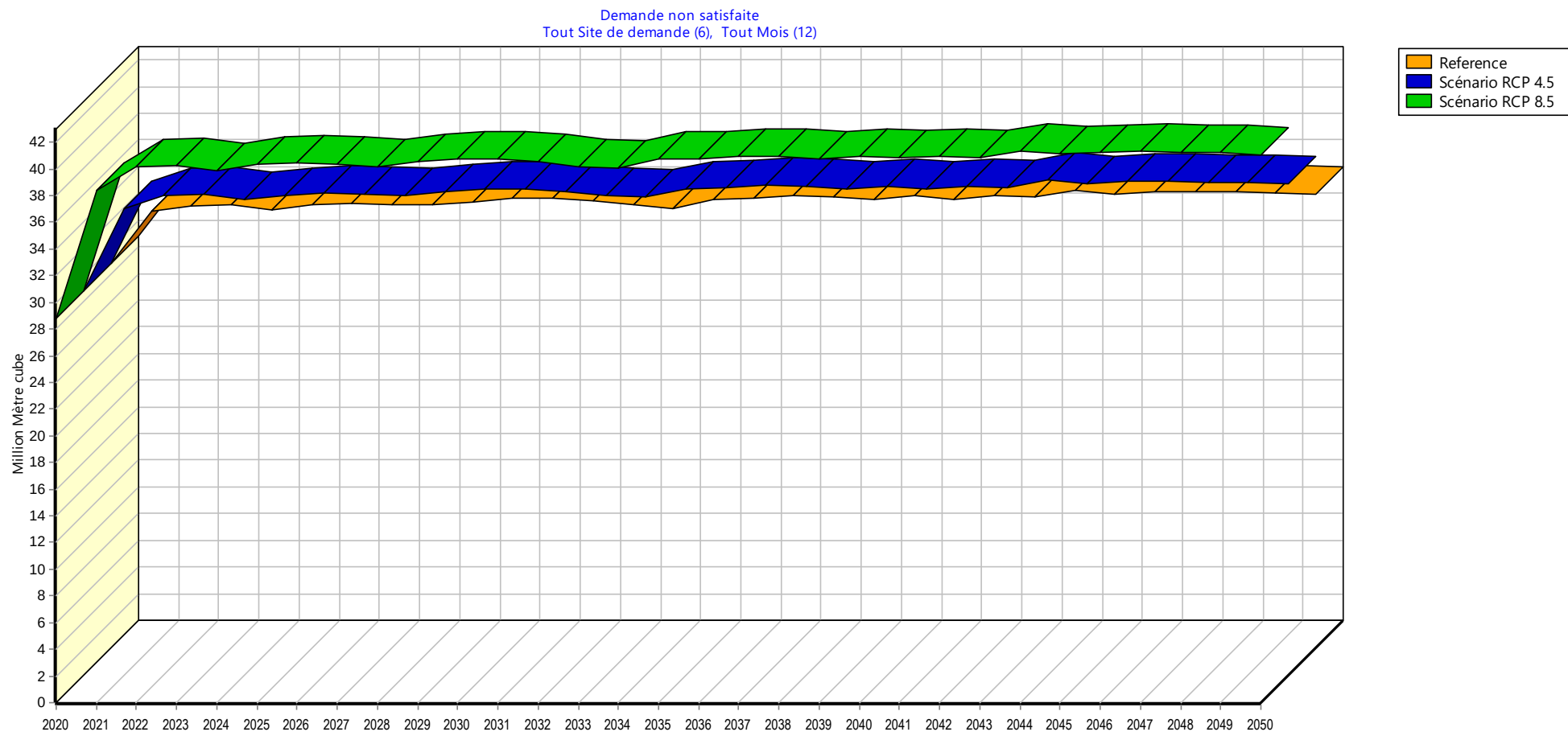


Figure 28 : Demande en eau non satisfaite suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon 2050

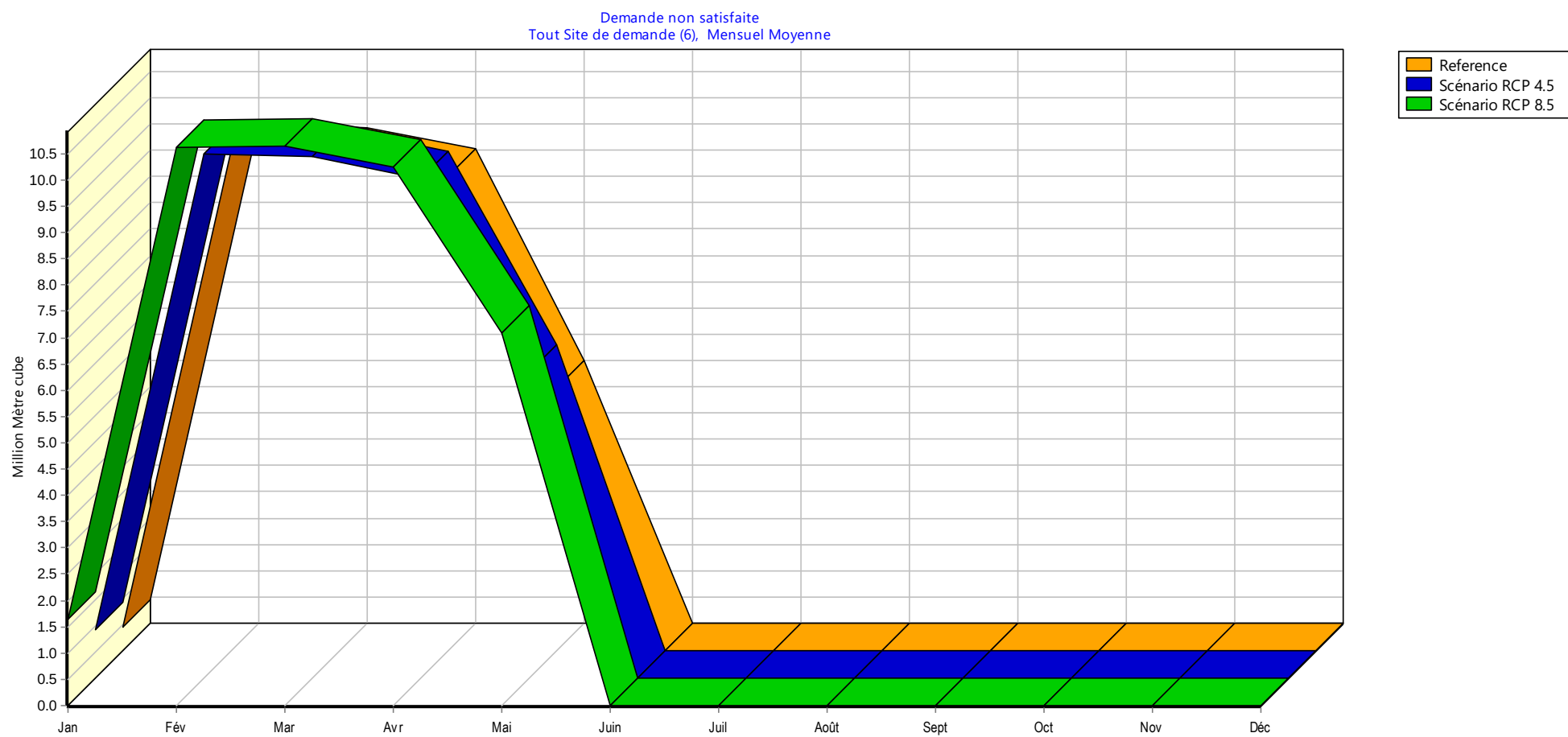


Figure 29 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l’horizon 2050

3.5.3.2. Scénario combiné du changement climatique et de l'extension des périmètres irrigables

Sous l'effet du changement climatique et l'extension des périmètres irrigables à l'horizon 2050, les ressources en eau ne suffiront pas à satisfaire les besoins en eau agricole si les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 se confirmaient (Figure 30). La demande en eau non satisfaite atteindra 54 millions de m³ en 2050 pour le scénario RCP4.5 et 59 millions de m³ pour le scénario RCP8.5 pour les usagers. De façon globale, c'est au cours de la saison sèche que les problèmes liés à l'eau s'observeront le plus (Figure 31), surtout au cours du mois de février avec une moyenne mensuelle de demande en eau non satisfaite s'élevant à 12 millions de m³.

Ces résultats montrent bien qu'à l'horizon 2050 le changement climatique (scenario RCP4.5 ou RCP8.5) va accentuer des pénuries d'eau dans le bassin versant de la Haute Comoé. Ces pénuries seront plus sévères dans le scénario RCP8.5 que dans le Scénario RCP4.5. Si ces scénarii se confirmaient, les impacts associés risqueraient de compromettre toute initiative de développement de l'agriculture de contre-saison et accentueront du même coup l'insécurité alimentaire.

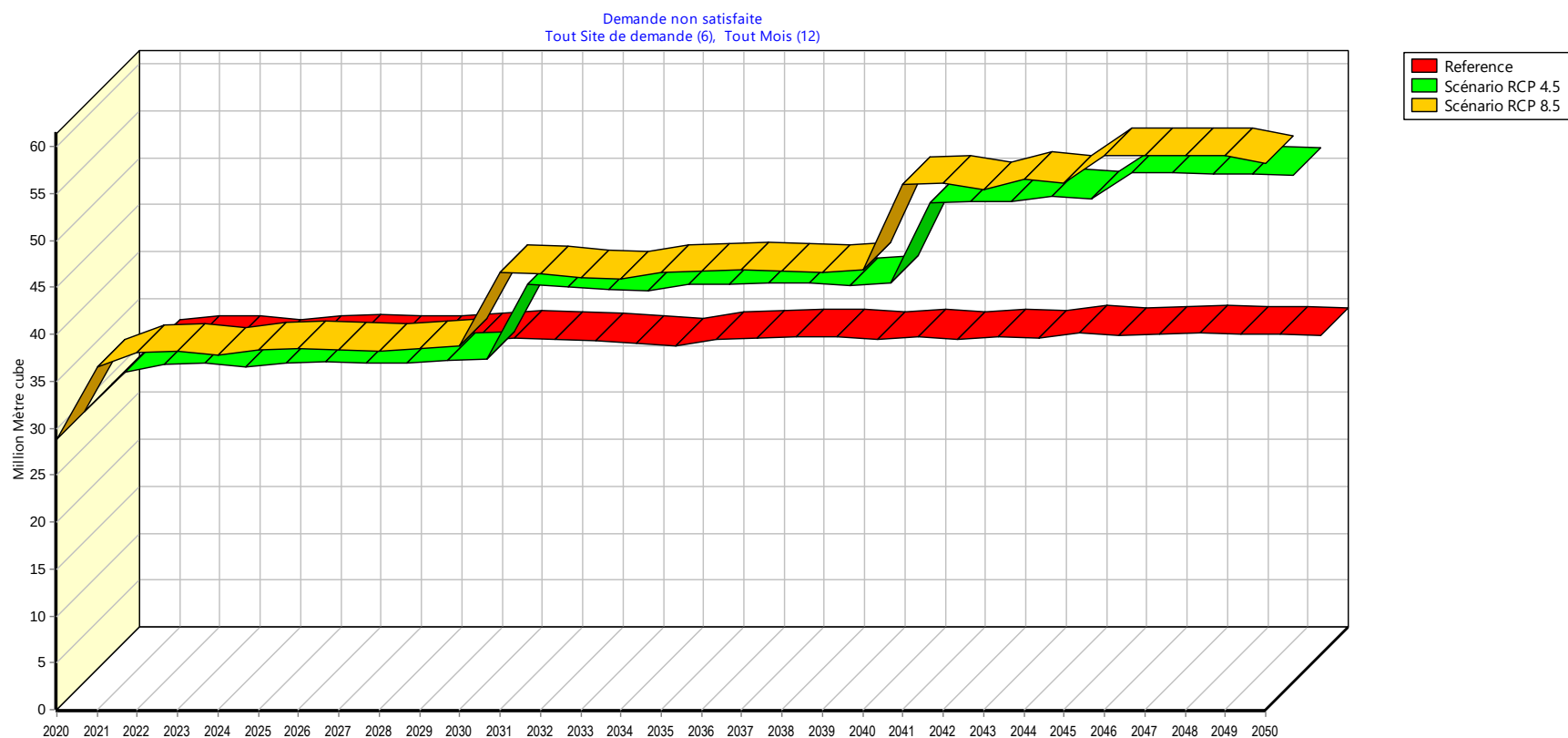


Figure 30 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario combiné du changement climatique et l'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050

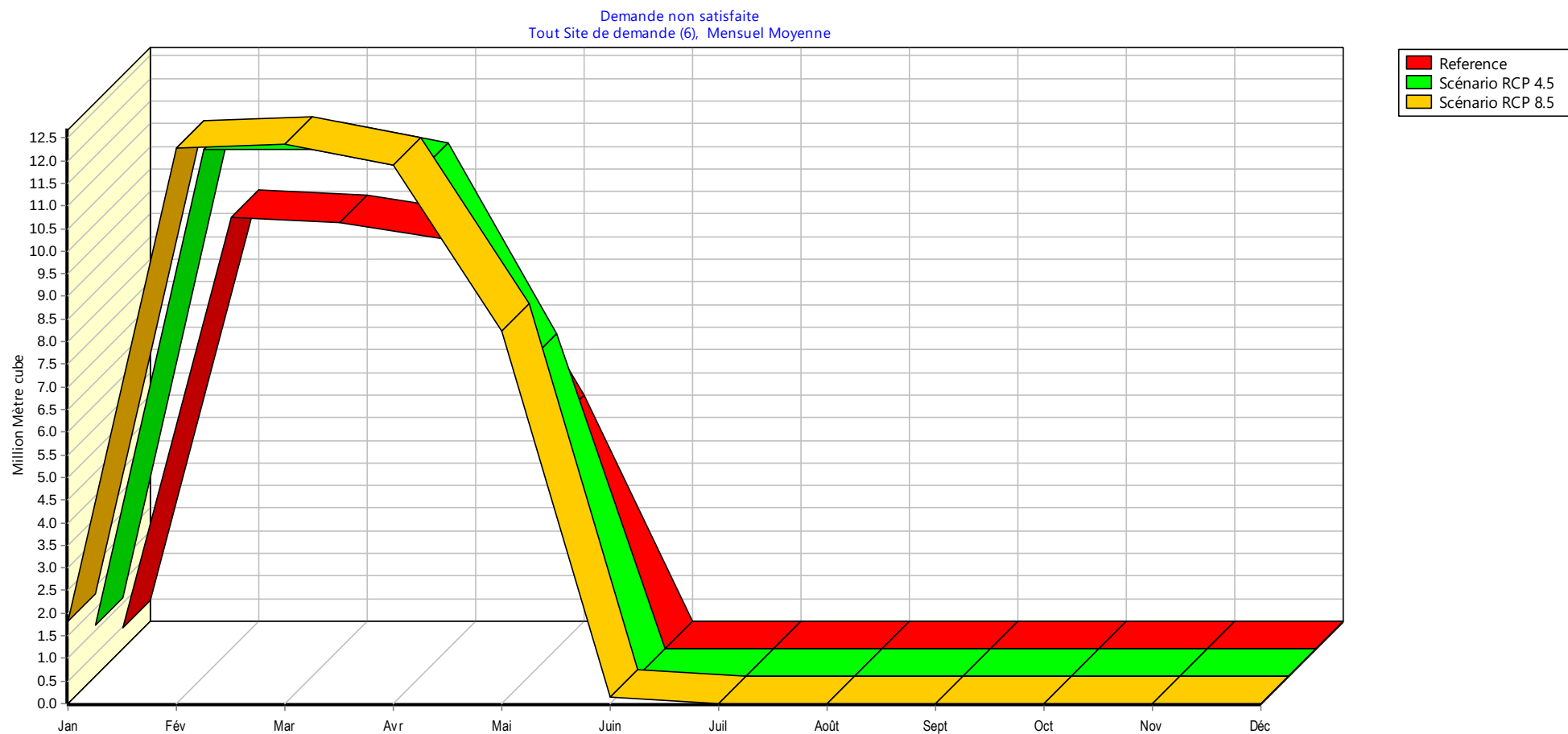


Figure 31 : Demande en eau mensuelle non satisfaite suivant le scénario combiné du changement climatique et l'extension des périmètres agricoles à l'horizon 2050

3.6. Elaboration des scénarios d'optimisation

3.6.1. Scenario de nouvelle technique d'irrigation

Le scénario « nouvelle technologie agricole » suppose une réduction de la consommation d'eau de 40% par le recours à l'irrigation goutte à goutte ou par aspersion sur 50% des exploitations.

Ce scénario prend en compte l'effet cumulé de l'extension des périmètres irrigués et du changement climatique et suppose qu'à partir de 2030, le périmètre de Karfiguéla passera au système d'irrigation par aspersion ou goutte à goutte tandis que le périmètre des maraichers passera au système gravitaire. Comme le montre la figure 32, cette mesure réduit considérablement dans un premier temps la demande en eau qui passe de 61,78 à 56,16 millions de m³ pour le RCP8.5 et de 57,53 à 51,84 millions de m³ pour le RCP4.5. A partir de 2040, on note une augmentation de la demande en eau qui passe de 56,51 à 66,42 millions de m³ pour le RCP8.5 et de 52,22 à 60,98 millions de m³ pour le RCP4.5. Cela s'explique par le fait qu'à partir de l'année 2040, on assiste à l'augmentation des superficies irrigables comme mentionné dans le tableau 3.

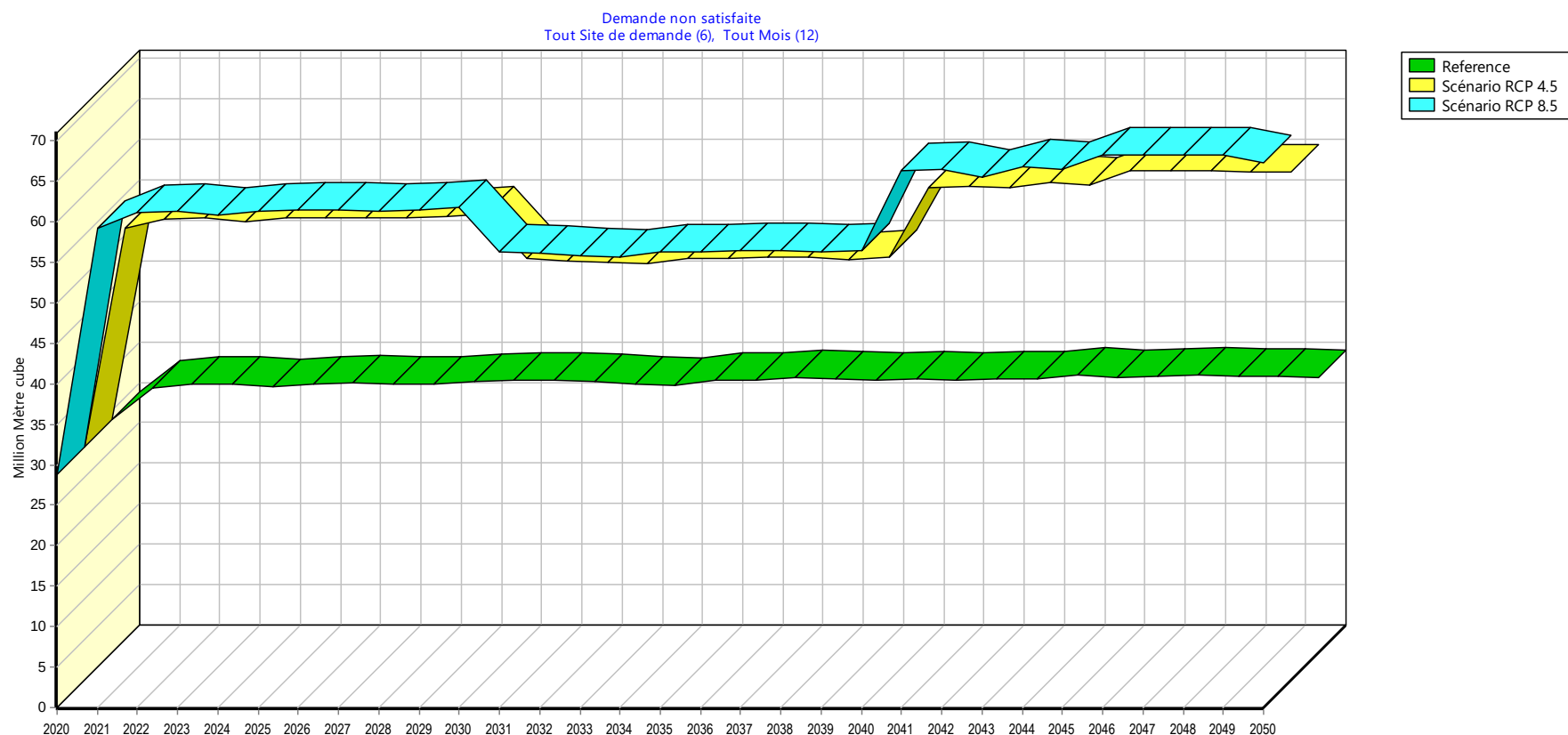


Figure 32 : Demande en eau non satisfaite suivant le scénario de nouvelle technique d'irrigation à l'horizon 2050

3.6.2. Scénario de nouvelles sources d'eau pour l'approvisionnement en eau

Les simulations effectuées à travers les différents scénarios montrent que la satisfaction des besoins en eau pour les activités sera difficile à atteindre à l'horizon 2050. Le scénario d'utilisation de nouvelles sources d'approvisionnement explore la possibilité d'utiliser les eaux souterraines notamment l'aménagement des différentes sources dans le bassin en complément des trois barrages exploités (Moussodougou, Lobi, Toussiana) sous les effets combinés du changement climatique et de la forte croissance démographique au-delà de l'horizon 2050. Ainsi, il est proposé la réalisation des forages à gros débits pour satisfaire en priorité les besoins en eau potable de la population et du cheptel. La figure 33 montre que la réalisation de ces forages pourrait contribuer à satisfaire les demandes en eau potable de la population et du cheptel jusqu'en 2029 et 2039 pour respectivement le RCP8.5 et le RCP4.5.

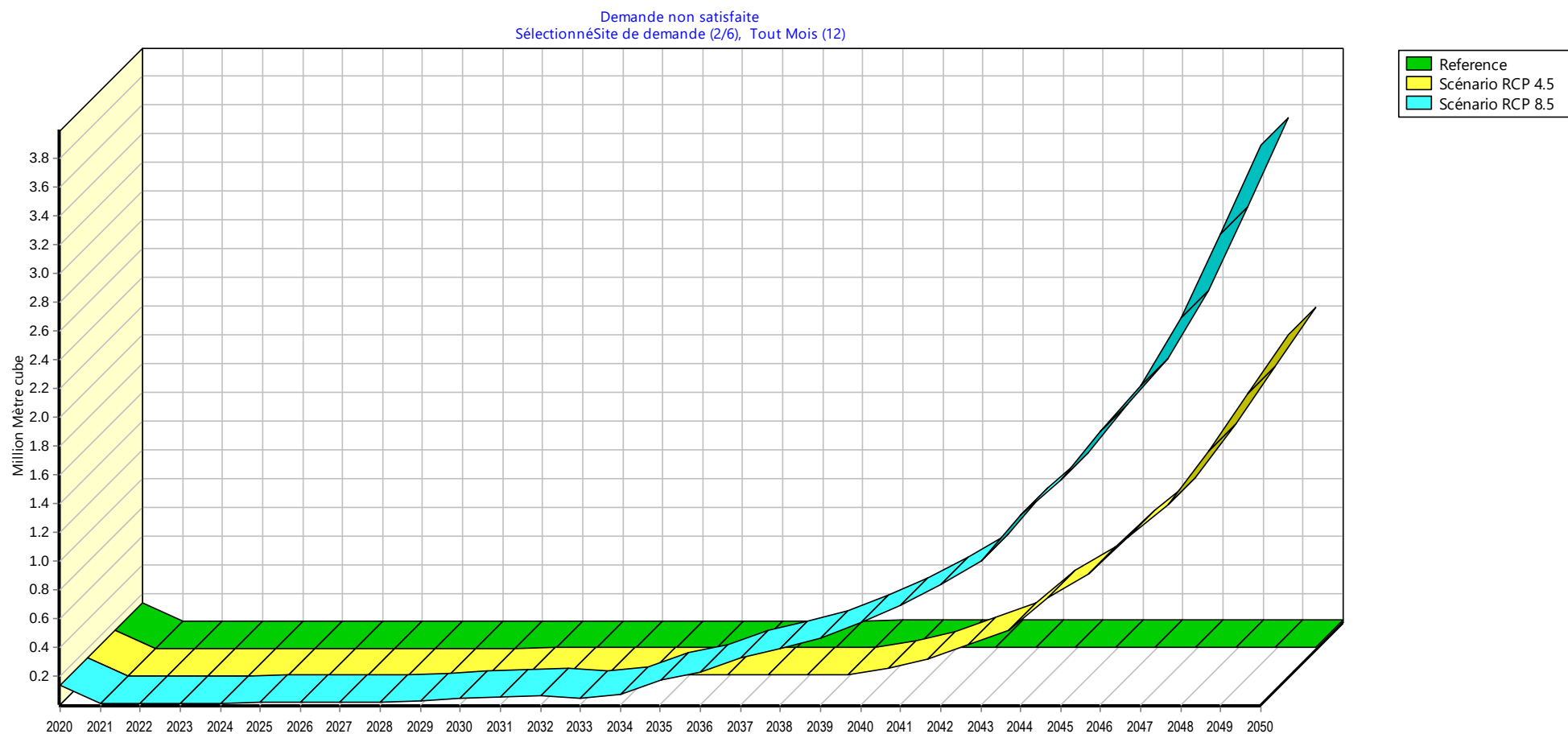


Figure 33 : Demande non satisfaite suivant le scénario « nouvelles sources d'approvisionnement » à l'horizon 2050

Discussion

L'application du modèle HEC-HMS au sous bassin de la Haute Comoé a donné des résultats satisfaisants avec de valeurs acceptables des critères de performance au calage (Nash = 0,738, RMSE = 4,7 et BIAIS = 2,5) et à la validation (Nash = 0,693, RMSE = 5 et BIAIS = 2,9). Le modèle arrive à reproduire la forme de l'hydrogramme en respectant le début et la fin. Cependant, les débits de pointe sont sous-estimés et ceci pourrait s'expliquer par les fluctuations fréquentes observées sur les hauteurs d'eau. Cette instabilité est due à la présence des ouvrages hydrauliques en amont ainsi que des périmètres agricoles irrigués où la gestion de l'eau n'est pas optimale. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de (Ramdé, 2020) qui est arrivé à la même conclusion dans son étude portant sur la « Modélisation pluie-débit du bassin versant du Mouhoun à la station de Banzon au Burkina Faso : application du modèle hydrologique HEC-HMS »

L'application du modèle WEAP au sous bassin de la Haute Comoé montre un déséquilibre entre l'offre et la demande sur la période de référence 2021-2050 et exacerbé pendant les mois de février-mars-avril-mai. Ces résultats corroborent avec les résultats des études menées sur le complexe Mouhoun-Sourou avec le logiciel WEAP 21 par (Saouto, 2016) qui a montré que la demande est déficitaire durant les mois de février, mars, avril de façon générale au Burkina Faso. Sur cette période, les ressources en eau ne pourront plus supporter les demandes en eau des périmètres irrigués et cela est la conséquence de plusieurs facteurs. En effet le bassin de la Comoé étant un bassin transfrontalier, la majorité des eaux s'écoule vers la Côte d'Ivoire (97% selon Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2000) et également les eaux souterraines sont peu exploitées car peu connues. La solution pourra donc venir de la réalisation d'infrastructures de mobilisation de ressources en eau de surface et souterraines comme le préconise également (Ouédraogo, 2020) .

Nous pouvons retenir que les ressources sont bien gérées dans l'ensemble par les acteurs du sous bassin. En effet, bien que les demandes des différents usagers semblent ne pas être satisfaites, la gestion de l'eau permet de maintenir un débit sanitaire, nécessaire pour la préservation de la ressource et des écosystèmes associés sur la Comoé. Aussi d'énormes efforts sont réalisés par les grands usagers (SN-SOSUCO et périmètre aménagé) pour réduire les demandes en eau. Ce sont notamment l'introduction de techniques de productions moins consommatrices en eau (irrigation localisée), par la réduction des superficies exploitées en fonction de la disponibilité en eau et par l'alternance des campagnes pour les coopératives du périmètre de Karfiguela (au niveau de la plaine de Karfiguéla, les producteurs sont organisés en cinq (05) coopératives. Si l'année n les coopératives 1, 2 et 3 font la culture de contre saison alors l'année n +1 ce seront les coopératives 4 et 5 qui feront la culture de contre saison).

Nous assistons à un développement des activités d'exploitation artisanale de l'or et de l'utilisation de plus de pesticides pour le contrôle des maladies et des ravageurs des cultures. Cependant, les impacts de telles activités sur les ressources en eau pour l'heure ne sont pas encore bien maîtrisés (MEA, 2016). Cela constitue donc un appel fort pour des études approfondies pour mieux connaître et protéger les ressources en eau dans le sous bassin.

Conclusion générale et perspectives

Cette étude a pour objectif de contribuer au développement d'un outil de gestion intégrée devant permettre d'optimiser, dans une vision prospective, la gestion des ressources en eau dans le sous bassin versant de la Haute Comoé. La vision prospective sous-entend la construction de scénarii climatiques et de gestion de l'eau en rapport avec la réalité sur le terrain.

Ainsi, plusieurs scénarii en l'occurrence le changement climatique, l'accroissement de la population, l'accroissement des superficies cultivées ont été analysés à l'horizon 2050 afin d'évaluer la capacité des ressources à satisfaire les usages pour la consommation humaine, l'agriculture et le cheptel. Toutes les projections ont été faites à l'aide du modèle WEAP 21 qui est un outil d'aide à la décision et qui utilise une approche intégrée pour simuler la demande en eau, l'offre, le stockage, etc.

Le scénario de référence montre globalement que la situation actuelle de la demande est déficitaire durant les mois de février, mars, avril et mai dans le sous bassin de la Haute Comoé. Les effets d'un accroissement des superficies cultivées occasionneront des déficits de Janvier à Mai. Le scénario climatique envisagé prévoit davantage à l'horizon 2050 une diminution de la capacité d'allocation en eau durant la campagne sèche dans le bassin.

Tous les résultats obtenus confirment l'hypothèse de départ selon laquelle les ressources en eau du bassin vont connaître une dépréciation significative eu égard aux pressions anthropiques et aux effets du changement climatique.

Des scénarii d'optimisation comme le recours à une nouvelle technologie d'irrigation montrent des perspectives d'amélioration de la situation même si le scénario d'accroissement des superficies cultivées se confirmait. Cependant, dans les hypothèses que les mêmes sources d'approvisionnement sont maintenues, les effets cumulés de l'accroissement des superficies cultivées et du changement climatique limiteront la capacité d'allocation des ressources en eau à l'horizon 2050. Toutefois, le recours à de nouvelles sources de prélèvements complémentaires permettra juste d'assurer les besoins en eau de consommation des populations et du cheptel jusqu'en 2029 pour le scénario RCP8.5 et 2039 pour le RCP4.5 : cela montre à quel point les effets du changement climatique devraient être mis en priorité dans les politiques de nos Etats afin de préserver de façon durable nos ressources. Ces derniers résultats réfutent l'hypothèse selon laquelle l'application d'une démarche de gestion intégrée permettra de satisfaire la demande malgré le changement climatique.

Afin de parfaire ce travail, d'autres aspects n'ayant pas été abordé dans ce document, par manque de données d'entrée surtout, pourront faire l'objet d'autres études. En effet, de futurs travaux peuvent investiguer sur les aspects suivants :

- analyse de l'impact de la sédimentation sur la disponibilité de la ressource en eau ;
- analyse de l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux du bassin versant, utilisées pour l'AEP ;
- bilan hydrologique sur les trois (03) barrages en vue de connaître réellement les flux entrants et sortants de ces barrages ;
- analyse comparative des cinq (05) méthodes de WEAP et déduire la meilleure méthode pour la gestion des ressources en eau dans le sous bassin de la Haute Comoé.

Références bibliographiques

- AEC, 2018. Analyse diagnostique de l'état des lieux du périmètre irrigué de Karfiguéla. Rapport provisoire. Agence de l'Eau des Cascades.
- AEDE, 2009. Programme des lachûres d'eau, campagne 2008–2009. « Comité Local de l'Eau-Haute Comoé », Association Eau Développement et Environnement, Banfora, Burkina Faso.
- Alfarra A., Kemp-Benedict E., Hötzl H., Sader N., Sonneveld B., 2012. Modeling water supply and demand for effective water management allocation in the Jordan Valley. *Journal of Agricultural Science and Applications (JASA)*, 1(1), 1-7.
- Amedée Chabi, Eric Adéchina Alamou, Eliézer Iboukoun Biao, Ezéchiél Obada, Josué Zandagba. Assessment of Water Balance in the Ilauko Reservoir of the Ouémé at Savè Catchment (Benin, West Africa). *Hydrology*. Vol. 7, No. 1, 2019, pp. 15-23.
- Ardoïn-Bardin S., 2004. Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (PhD Thesis). Université Montpellier II, 440p
- Ballo K., 2010. Evaluation des performances du périmètre irrigué de Karfiguéla. Mémoire de fin d'étude. Zie, Ouagadougou, 49p.
- BERASE, 2018. Etude diagnostique et d'évaluation du fonctionnement du périmètre irrigué de Karfiguéla dans le sous-bassin de la haute-Comoé. Agence de l'Eau des Cascades.
- Bougma A., 2020. Optimisation de l'utilisation des ressources en eau dans une vision prospective : application du modèle WEAP au bassin versant de la Léraba orientale à la station hydrométrique de Douna au Burkina Faso. AGRHRYMET, Niamey, 50p.
- Bruneau P. et 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.
- Chambre de commerce d'industrie et d'artisanat du Burkina Faso, 2006. Données économiques et sociales du Burkina Faso, Ouagadougou, CCIA.
- Chaumont D., Chartier I., 2005. Développement de scénarios hydrologiques à des fins de modélisation de la dynamique sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques. *Rapport Ouranos*.
- Choayb M., 2016. Modélisation pluie-débit par le logiciel « HEC-HMS » de sous bassin versant de l'Oued Sahel, Mémoire de fin d'étude. Université Mohamed Boudiaf, Algérie, 74p.
- DANIDA, 1991. Copenhagen informal consultation on integrated water resources development and management, 11-14 November: case studies. Nordic freshwater initiative. Danish International Development Agency, Copenhagen Danemark.
- Droogers P., Terink W., Hunink J., Kauffman J. H., van Lynden, G. W. J., 2011. Options de gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou, Maroc—Analyse avantages-coûts utilisant le modèle WEAP. *Green Water Credits Report M2a*.
- Dupont J., Smits J., Rousseau A. N., Mailhot A., Gangbazo G., 2016. « Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau », *Revue des sciences de l'eau*, Volume 11, numéro hors-série, 1998 ».

- Etkin D., Kirshen P., Watkins D., Roncoli C., Sanon M., Some L., Hoogenboom, G., 2015. Stochastic programming for improved multiuse reservoir operation in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), 04014056.
- FAO, 2017. Crop Water Information. FAO. Retrieved September 12, 2022, from <http://www.fao.org/landwater/databases-and-software/crop-information/en>.
- Hadded R., I. Nouiri, O. Apshihabi, J. Tarhouni, 2013. A Decision Support System to manage the ground water of the zeuss Koutine. P1981-2000.
- Hempel S., Frieler K., Warszawski L., Schewe J., Piontek F., 2013. A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219-236.
- 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.
- Höllermaun B., Giertz S., Diekkrüger B., 2010. Benin 2025—Balancing future water availability and demand using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System. *Water resources management*, 24, 3591-3613.
- Institut National de la Statistique et de la Démographie, 2007. Résultat préliminaire du recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2006 du Burkina Faso, 51p.
- Lamarque P., Jourdain S., 1994. Elaboration de longues séries climatologiques homogènes pour l'étude de l'évolution climatique. *La météorologie*, 1994(7), 61-68.
- 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.
- Ly M., Segnon A. C., D'haen S., Totin E., Noblet M., Camara I., Pflleiderer P., 2019. Comprendre et interpréter les sorties de modèles climatiques pour la conduite des études de vulnérabilité: Guide à l'attention des praticiens. *Climate Analytics gGmbH, Berlin*.
- MAHRH, 2009. Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau du Burkina Faso (PAGIRE), 62p.
- Ministère de l'Environnement et de l'Eau et Assistance Technique Carl Bro-DHI/VKI-IWACO, 2000. Connaissance des ressources en eau sur le plan quantitatif. Pertinence du système de suivi. Royaume du Danemark Ministère des affaires étrangères, DANIDA.
- Ministère de l'Environnement et de l'Eau, Burkina Faso, 2001. État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. Version finale.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash J.E., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 398–409.
- Nouiri I., Saidi F., Romdhane A., Brini R., Bouslama A., El Beji R., et Tarhouni J., 2015. Modélisation par WEAP de la gestion des ressources en eau et des usages du système Nebhana en Tunisie. Eaucimat'2015, 25 novembre 2015.
- Orstom, 1997. Synthèse des travaux effectués sur hydram, Orstom, Ouédraogo A., Burkina Faso.

Ouédraogo A. V., 2020. 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, Mémoire de fin d'étude. 2ie, Ouagadougou, 66p.

Programme Ressources en Eau du Sud-Ouest (P/ RESO), 1998. Diagnostic des ressources en eau dans le bassin versant de la Comoé.

PADI-BF 101, 2013. Gestion Durable des Eaux Souterraines pour l'Agriculture Irriguée.

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.

Ramdé W. N., 2020. Modélisation de l'offre et de la demande dans un contexte de changement climatique dans le bassin supérieur du Nakanbé : application du modèle WEAP à la gestion intégrée des ressources en eau Mémoire de fin d'étude 2ie, Ouagadougou, 55p.

Roncoli C., Ingram K., Kirshen P., 2001. The costs and risks of coping with drought: livelihood impacts and farmers¹ responses in Burkina Faso. *Climate research*, 19(2), 119-132.

Saouto A, 2016. Optimisation des allocations des eaux de surface dans une vision prospective : application du modèle WEAP21 au complexe Mouhoun Sourou au Burkina Faso, Mémoire de fin d'étude. 2ie, Ouagadougou, 57p.

SEI (Stockholm Environment Institute), 2008. Tutoriel du système d'évaluation et de planification des ressources en eau (WEAP), collection de modules autonomes pour aider à apprendre le logiciel WEAP. Traduction française de : Issam NOUIRI.

Soclo P.W., 2010. Bilan ressources/usages de l'eau dans le bassin de la volta et scenario d'utilisation de la ressource en eau en Afrique de l'Ouest Mémoire de fin d'étude. 2ie, Ouagadougou, 69p.

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*, (Volume 5), 55-73.

Traoré F., Cornet Y., Denis A., Wellens J., Tychon B., 2013. Monitoring the evolution of irrigated areas with Landsat images using backward and forward change detection analysis in the Kou watershed, Burkina Faso. *Geocarto International*, 28(8), 733-752.

WAIPRO-CILS-IWMI, 2010. Gestion des eaux du bassin de la Haute Comoé, projet CILS-IWMI-USAID, 21p.

Wellens J., D. Raes, A. Denis, B. Djaby, 2014. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127, 40-47.

Winchell M, Srinivasan R, DI Luzi M., Arnold J., 2013. ARCSWAT interface for SWAT 2012 : user's guide.

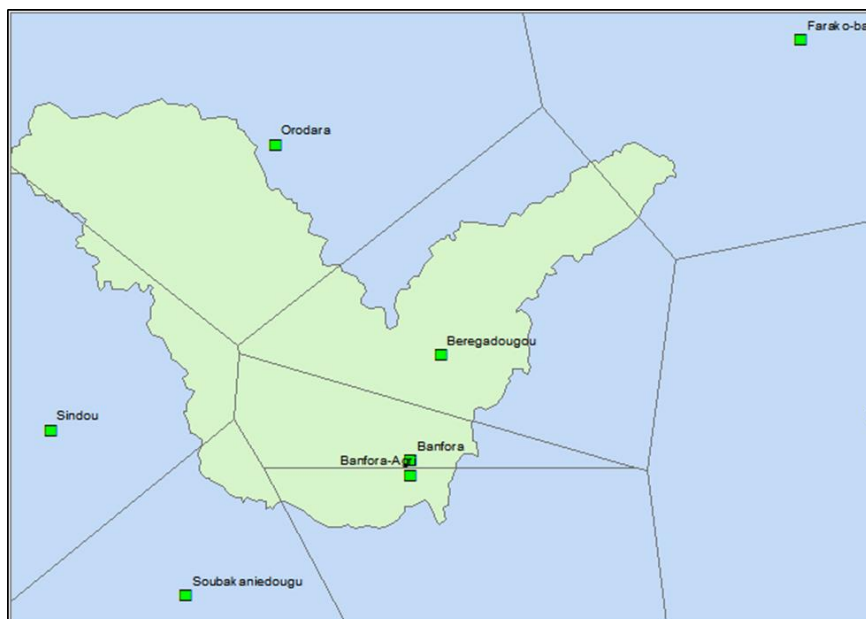
Yates D., Sieber J., Purkey D. Huber-Lee A., 2005. WEAP21—Un modèle de planification de l'eau axé sur la demande, les priorités et les préférences : partie 1 : caractéristiques du modèle. *Water international*, 30(4), 487-500.

Yéo W. E., 2008. La gestion intégrée des ressources en eau du bassin transfrontalier de la Comoé. 2ie, Ouagadougou, 34p.

Zerbo D., 2017. Etat de la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans le sous bassin versant de la haute-Comoé au Burkina Faso. ULg-Faculté des Sciences-Département des Sciences et Gestion de l'Environnement UCL-Faculté des bio-ingénieurs, 49p.

Annexes

Annexe 1 : Répartition des stations pluviométriques



Stations	Superficie	Poids
Orodara	656,35	34,04
Sindou	152,58	7,91
Soubakagnédougou	55,17	2,86
Banfora	401,16	20,80
Bérégnadougou	618,54	32,08
Farakobâ	44,2	2,29
Total	1928	100

Les données des stations de Banfora, Bérégnadougou et Orodara ont été considérées pour les calculs au vue de la disponibilité de leurs données et de leur poids très élevés par rapport aux poids des stations de Sindou, Farakobâ, et Soubakagnédougou.

Annexe 2 : Populations desservies par l'ONEA dans les communes urbaines de Bérégadougou et Banfora

Années	Centres	Populati on	Nombre de brancheme nts	Populations desservies par les BF	Population totale desservie	Taux d'accès
2015	BANFORA	110891	7080	51200	110891	100%
2016		115660	7553	51200	115660	100%
2017		120633	8246	51200	120633	100%
2018		125820	8629	51200	125820	100%
2019		128732	9040	51600	128732	100%
2020		133624	9535	54400	133624	100%

Source : SDRE/ONEA

Années	Centres	Populati on	Nombre de branchem ents	Populations desservies par les BF	Population totale desservie	Taux d'accès
2015	Bérégadougou	7113	394	6800	7113	100%
2016		7333	436	7600	7333	100%
2017		7561	511	4599	7561	100%
2018		7795	561	5049	7795	100%
2019		7882	603	5427	7882	100%
2020		8087	658	5922	8087	100%

Source : SDRE/ONEA

Annexe 3 : Besoins en eau des cultures avec CropWat

- Besoins en eau de la tomate

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	Etc mm/jour	Etc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes.Irr. mm/dec
Déc	1	Init	0.6	2.67	26.7	0	26.7
Déc	2	Init	0.6	2.65	26.5	0	26.5
Déc	3	Crois	0.6	2.77	30.5	0	30.5
Jan	1	Crois	0.69	3.31	33.1	0	33.1
Jan	2	Crois	0.82	4.12	41.2	0	41.2
Jan	3	Crois	0.97	5.02	55.2	0	55.2
Fév	1	Mi-sais	1.11	5.95	59.5	0	59.5
Fév	2	Mi-sais	1.14	6.37	63.7	0	63.7
Fév	3	Mi-sais	1.14	6.59	52.8	0.1	52.6
Mar	1	Mi-sais	1.14	6.9	69	0.7	68.2
Mar	2	Mi-sais	1.14	7.16	71.6	1.1	70.5
Mar	3	Arr-sais	1.12	6.85	75.4	4.4	71
Avr	1	Arr-sais	1.01	5.97	59.7	7.7	52
Avr	2	Arr-sais	0.89	5.16	51.6	10.5	41.2
Avr	3	Arr-sais	0.8	4.51	18	5.9	10.7
Total					734.5	30.4	702.6

- Besoins en eau de la canne à sucre

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	Etc mm/jour	Etc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes.Irr. mm/dec
Déc	1	Init	0.4	1.78	17.8	0	17.8
Déc	2	Init	0.4	1.77	17.7	0	17.7
Déc	3	Crois	0.4	1.85	20.4	0	20.4
Jan	1	Crois	0.49	2.34	23.4	0	23.4
Jan	2	Crois	0.62	3.1	31	0	31
Jan	3	Crois	0.76	3.94	43.4	0	43.4
Fév	1	Crois	0.9	4.84	48.4	0	48.4
Fév	2	Crois	1.03	5.75	57.5	0	57.5
Fév	3	Crois	1.15	6.64	53.1	0.1	53
Mar	1	Mi-sais	1.2	7.23	72.3	0.7	71.5
Mar	2	Mi-sais	1.2	7.5	75	1.1	73.9

Mar	3	Mi-sais	1.2	7.33	80.6	4.4	76.2
Avr	1	Mi-sais	1.2	7.11	71.1	7.7	63.4
Avr	2	Mi-sais	1.2	6.97	69.7	10.5	59.3
Avr	3	Mi-sais	1.2	6.73	67.3	14.7	52.5
Mai	1	Mi-sais	1.2	6.48	64.8	19.7	45.1
Mai	2	Mi-sais	1.2	6.23	62.3	24.1	38.2
Mai	3	Mi-sais	1.2	5.94	65.3	25.7	39.6
Jui	1	Mi-sais	1.2	5.65	56.5	26.1	30.4
Jui	2	Mi-sais	1.2	5.36	53.6	27.5	26.1
Jui	3	Mi-sais	1.2	5.14	51.4	32.9	18.5
Jui	1	Mi-sais	1.2	4.92	49.2	39.5	9.7
Jui	2	Mi-sais	1.2	4.7	47	44.8	2.2
Jui	3	Mi-sais	1.2	4.53	49.8	46.9	2.9
Aoû	1	Mi-sais	1.2	4.37	43.7	50.3	0
Aoû	2	Mi-sais	1.2	4.2	42	53.6	0
Aoû	3	Arr-sais	1.19	4.25	46.8	49.5	0
Sep	1	Arr-sais	1.15	4.15	41.5	46.4	0
Sep	2	Arr-sais	1.1	4.02	40.2	43.9	0
Sep	3	Arr-sais	1.04	4.08	40.8	33.6	7.2
Oct	1	Arr-sais	0.99	4.12	41.2	21.1	20.1
Oct	2	Arr-sais	0.94	4.13	41.3	10.9	30.4
Oct	3	Arr-sais	0.88	3.91	43	7.3	35.7
Nov	1	Arr-sais	0.82	3.69	36.9	0.1	36.8
Nov	2	Arr-sais	0.77	3.48	34.8	0	34.8
Nov	3	Arr-sais	0.72	3.22	32.2	0	32.2
Total					1732.6	643.2	1119

Annexe 4 : Répartition du cheptel par province dans la région des Cascades

	2016	2017	2018	2019	2020
Comoé					
Bovins	658 247	671 412	684 849	698 555	712 505
Ovins	189 672	195 362	173 836	207 258	213 475
Caprins	186 609	192 207	171 029	203 912	210 029
Porcins	50 444	51 453	52 489	nd	55 686
Léraba					
Bovins	45 448	46 357	47 292	48 228	49 192
Ovins	60 757	62 580	55 688	66 389	68 380
Caprins	52 696	54 277	48 302	57 581	59 308
Porcins	4 887	4 985	5 093	nd	5 403
Cascades					
Bovins	703 695	717 769	732 141	746 763	761 697
Ovins	250 429	257 942	229 524	273 647	281 855
Caprins	239 305	246 484	219 331	261 493	269 337
Porcins	55 331	56 438	57 582	nd	61 089

Source : DRRAH/Cascades

Annexe 5 : Paramètres physiques du bassin retenus au calage et à la validation avec HEC-HMS

Loss	Transform	Baseflow	Options
 Subbasin		Canopy	Surface
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 Description:  Downstream: Exutoire_Diarabakoko  *Area (KM2) 1928 Latitude Degrees: Latitude Minutes: Latitude Seconds: Longitude Degrees: Longitude Minutes: Longitude Seconds: Canopy Method: Simple Canopy  Surface Method: Simple Surface  Loss Method: SCS Curve Number  Transform Method: SCS Unit Hydrograph  Baseflow Method: Recession 			

 Subbasin	Canopy	Surface
Loss	Transform	Baseflow
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 Initial Type: Discharge  *Initial Discharge (M3/S) 5 *Recession Constant: 0,4 Threshold Type: Ratio To Peak  *Ratio: 0,5		

Loss	Transform	Baseflow	Options
 Subbasin		Canopy	Surface
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 *Initial Storage (%) 1 *Max Storage (MM) 30 Crop Coefficient: 1,05 Evapotranspiration: Wet and Dry Periods  Uptake Method: --None-- 			

 Subbasin	Canopy	Surface
Loss	Transform	Baseflow
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 Initial Abstraction (MM) 1 *Curve Number: 1 *Impervious (%) 24		

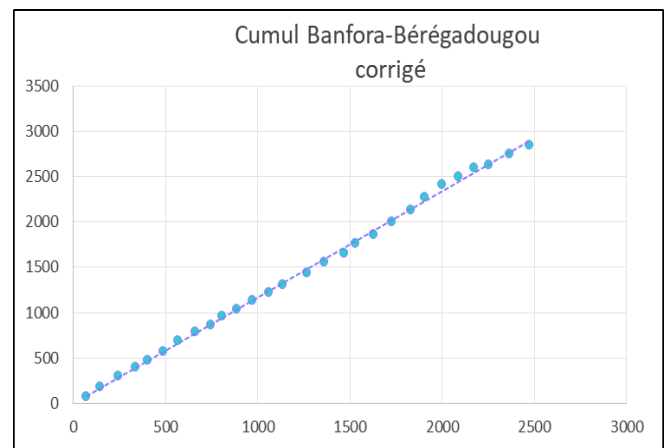
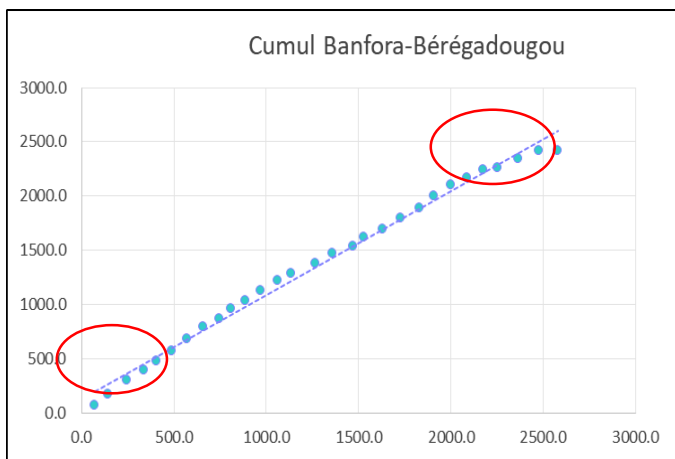
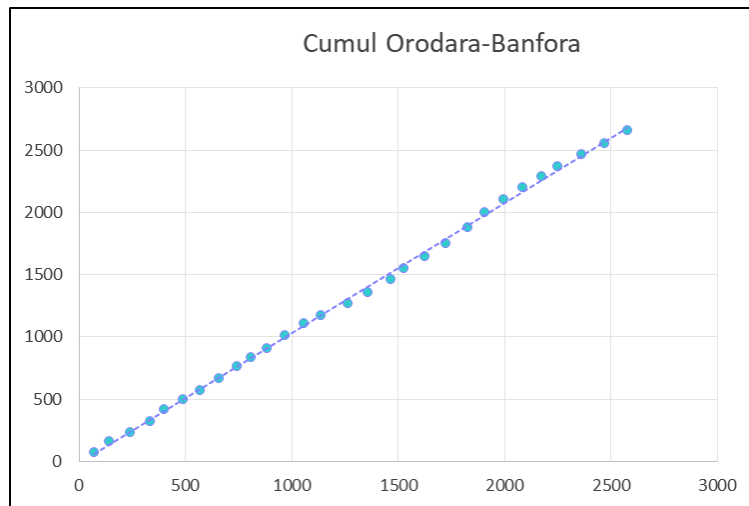
Loss	Transform	Baseflow	Options
 Subbasin		Canopy	Surface
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 *Initial Storage (%) 10 *Max Storage (MM) 10			

 Subbasin	Canopy	Surface
Loss	Transform	Baseflow
Basin Name: Bassin Element Name: Sous bassin 1 Graph Type: Peak Rate Factor 100  *Lag Time (MIN) 12500		

Annexe 6 : Contrôle des données par la méthode des doubles cumuls

La station de Banfora a été choisie comme station de référence pour l'étude d'homogénéité des stations de Orodara et Bérégadougou. L'étude d'homogénéité fait ressortir que les données pluviométriques de la station de Orodara sont homogènes. Contrairement aux données pluviométriques de la station de Orodara, celle de Bérégadougou est hétérogène.

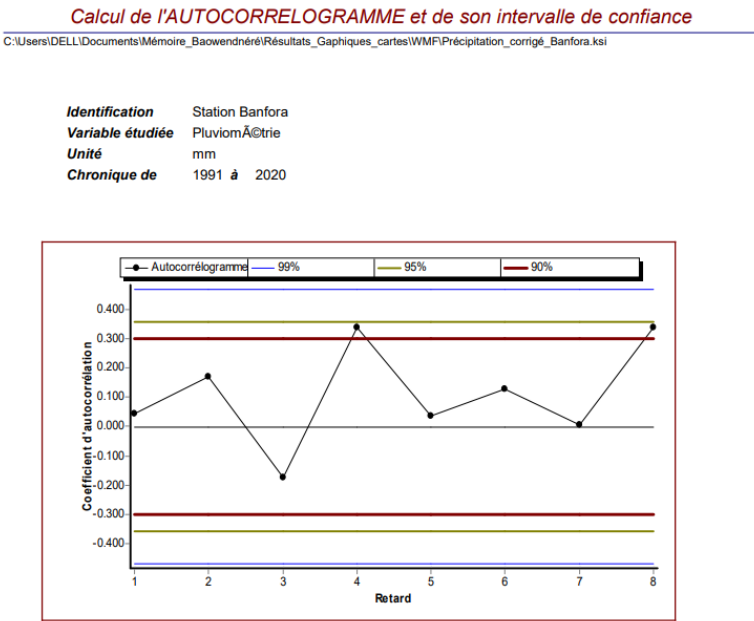
L'homogénéité à la station de Bérégadougou n'étant pas vérifiée, une correction des données a été faite par multiplication des valeurs de la période à corriger par le rapport de la pente de la droite jugée homogène par rapport à celle de la partie à corriger.



Annexe 7 : Vérification de l’homogénéité et 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. L’hypothèse alternative (celle d’une tendance) du test de corrélation sur le rang est donc vérifiée.

- Calcul de l’autocorrélogramme



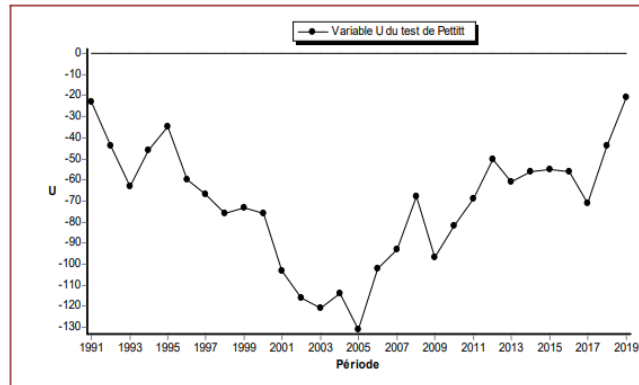
Les résultats des différents tests permettent de constater qu’à l’échelle du bassin, les séries pluviométriques analysées présentent des ruptures. Selon le test de Pettitt, une rupture est survenue en 2005 pour les stations de Banfora, Bérégadougou et en 2006 pour la station de Orodara. Le test de LEE et de HEGHINIAN et celui de HUBERT confirment également ces mêmes dates de rupture.

- Méthode non paramétrique de PETTITT

Méthode non paramétrique de PETTITT

C:\Users\DELL\Documents\Mémoire_Baowendnéré\Résultats_Graphiques_cartes\WMF\Precipitation_corrige_Banfora.ksl

Identification Station Banfora
Variable étudiée Pluviométrie
Unité mm
Chronique de 1991 à 2020

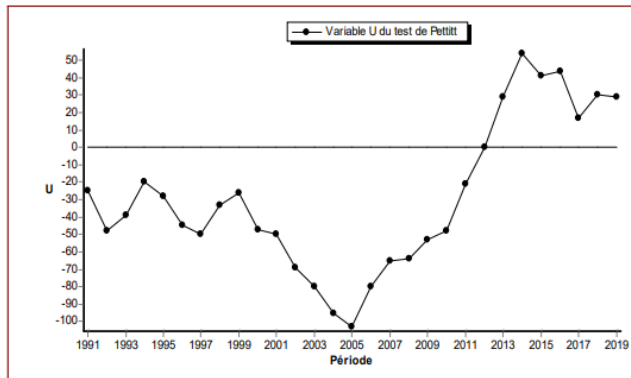


Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

C:\Users\DELL\Documents\Mémoire_Baowendnéré\Résultats_Graphiques_cartes\WMF\Precipitation_corrige_Mangodara.ksl

Identification Station Bérégadougou
Variable étudiée Pluviométrie
Unité mm
Chronique de 1991 à 2020

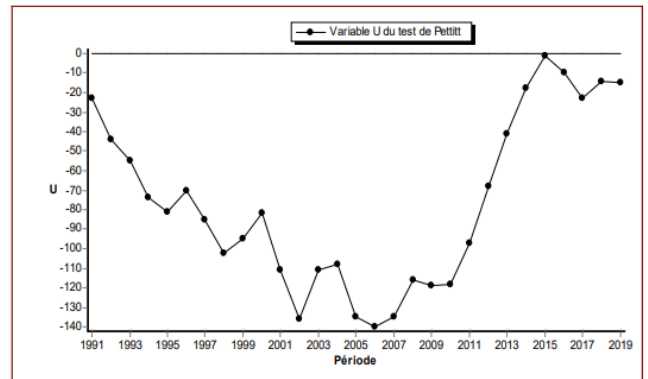


Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTITT

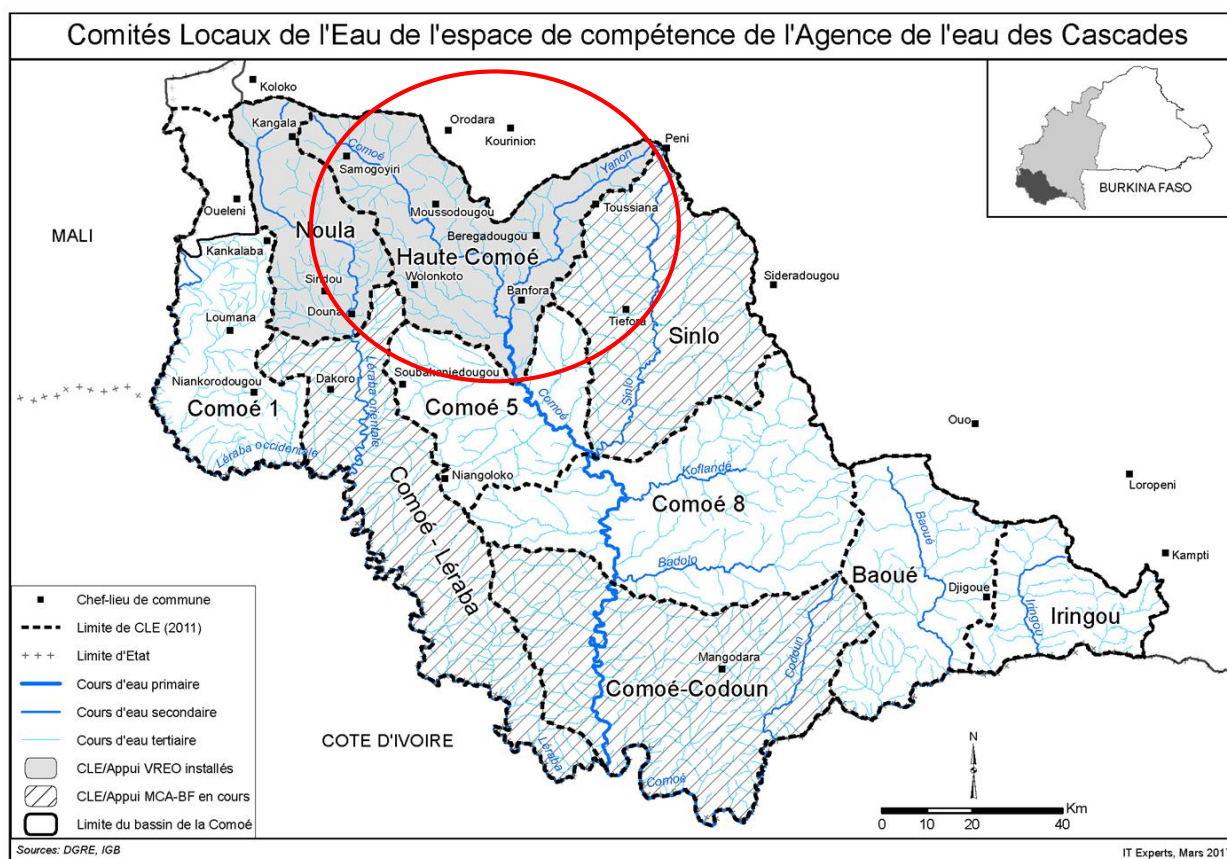
C:\Users\DELL\Documents\Mémoire_Baowendnéré\Résultats_Graphiques_cartes\WMF\Precipitation_corrige_Orodara.ksl

Identification Station Orodara
Variable étudiée Pluviométrie
Unité mm
Chronique de 1991 à 2020



Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%
Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Annexe 8 : Carte du bassin hydrographique des Cascades



Source : AEC, mars 2017

Annexe 9 : Niveau de remplissage des trois barrages au 24/01/2020

Barrages	Volumes (m ³)
Lobi	4 594 000
Moussodougou	27 180 000
Toussiana	4 845 000
Total	36 619 000

Source : Programme de lâchure d'eau de l'année 2020 du Comité Local de l'Eau du sous bassin versant de la Haute Comoe

Annexe 10 : Estimation du volume total disponible au 24/01/2020

Vol barrages au 24/01/2020	36 619 000
Apport cours d'eau février-juin (750 l/s)	10 238 400
Volume total mobilisable	46 857 400
Perte par évaporation	4 213 333
Volume mort	3 700 000
Total perte	7 913 333
Volume disponible	38 944 067

Source : Programme de lâchure d'eau de l'année 2020 du Comité Local de l'Eau du sous bassin versant de la Haute Comoe

Annexe 11 : Répartition des débits de lâchure par d’usagers

PERIODE	KARFIGUELA		MARAICHERS		ONEA		SOSUCO		Q_{envir}		TOTAL	
	l/s	m ³	l/s	m ³	l/s	m ³	l/s	m ³	l/s	m ³	l/s	m ³
Janvier	75	0	373	225 590	69	38 192	2 071	1 252 541	200	535 680	2 788	1 686 115
Février	145	363 312	896	2 245 018	69	158 223	2 071	5 189 098	200	501 120	3 381	8 471 154
Mars	145	388 368	896	2 399 846	69	169 135	1 911	5 118 422	200	535 680	3 221	8 626 828
Avril	145	375 840	896	2 322 432	69	163 679	1 911	4 953 312	200	518 400	3 221	8 348 543
Mai	75	194 400	373	999 043	69	169 135	1 716	4 596 134	200	535 680	2 433	6 516 249
Juin	0	0	145	388 368	69	163 679	1 600	4 147 200	200	518 400	2 014	5 219 999
TOTAL		1 321 920		8 580 298		862 043		25 256 707		3 144 960		38 868 887

Q_{envir} : Débit environnemental

Source : Programme de lâchure d’eau de l’année 2020 du Comité Local de l’Eau du sous bassin versant de la Haute Comoé

Annexe 12 : Calendrier hebdomadaire de répartition des volumes d'eau par usagers

Usagers	Jour d'irrigation
Plaine de Karfiguela	Lundi, Mardi, Mercredi
Maraichers	Jeudi, Vendredi, Samedi, Dimanche

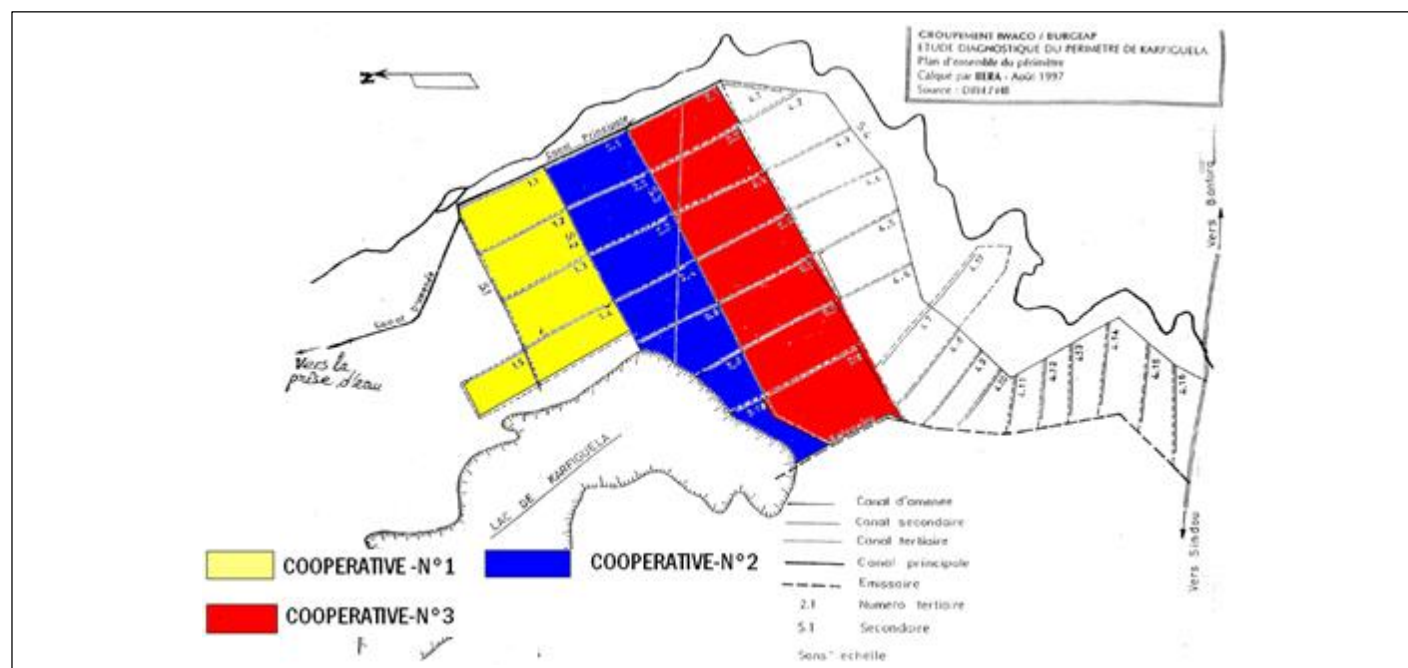
Source : Programme de lâchure d'eau de l'année 2020 du Comité Local de l'Eau du sous bassin versant de la Haute Comoé

Annexe 13 : Valeurs des paramètres du modèle utilisé en calage et validation avec le modèle WEAP

21

Paramètres		Valeurs
Direction privilégiée	Savane	0,38
	Forêt	0,28
	Zone de culture	0,5
Indice foliaire	Savane	6,1
	Forêt	5,35
	Zone de culture	8,10
Capacité de la couche supérieure	Savane	1630
	Forêt	1850
	Zone de culture	1545
Conductivité profonde		32

Annexe 14 : Plan d'ensemble du périmètre de Karfiguélé



Source : BERA, 2018