



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : **EAU**

présentée et soutenue publiquement

par

FOWE TAZEN

le 26 juin 2015

Réf/2015-09

**Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de
Boura en zone soudanienne du Burkina Faso**

JURY

M. Dapola Evariste Constant DA, <i>Professeur Titulaire</i> , Université de Ouagadougou, Burkina Faso	Président
M. Albert GOULA BI TIE, <i>Professeur Titulaire</i> , Université Nangui ABROGOUA, Côte d'Ivoire	Rapporteur
M. Pierre RIBSTEIN, <i>Professeur Titulaire</i> , Université Pierre et Marie CURIE, France	Rapporteur
M. Abel AFOUDA, <i>Maître de Conférences (CAMES)</i> , Université d'Abomey-Calavi, Benin	Examineur
M. Jean-Emmanuel PATUREL, <i>HDR</i> , Institut de Recherche pour le Développement, Côte d'Ivoire	Examineur
M. Harouna KARAMBIRI, <i>Maître de Conférences (CAMES)</i> , 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

DÉDICACE

Qu'il me soit permis de dédier très affectueusement ce travail à :

- ❖ Mon infatigable grand-mère, maman Justine MEDJOUONG, qu'elle y trouve la consolidation de ses efforts depuis ma tendre enfance ;
- ❖ Ma chère épouse Fernande WAGOUM et nos enfants chéris Jarel et Grace Léa FOWE pour tous les sacrifices consentis pendant toute la durée de cette thèse. Qu'ils y retrouvent le fruit de mes absences longues et répétées.

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit de plusieurs années de travail durant lesquelles il m'a été donné de recevoir un grand support de plusieurs personnes. Qu'il me soit permis ici de leur exprimer très vivement mes remerciements.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers la Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) qui m'a octroyée une allocation de recherche durant mes travaux de thèse. Cette thèse s'est déroulée dans le cadre du programme de recherche CPWF du bassin de la Volta. Je tiens à adresser mes remerciements à toute l'équipe du projet V3 en particulier Messieurs Philippe CECCHI, Jean-Christophe POUSSIN, Jean-Louis FUSILLIER, Bruno BARBIER et Frank ANNOR pour nos interactions intéressantes et enrichissantes et à l'équipe de coordination du programme en particulier à Madame Olufunke COFIE pour ses encouragements. Je remercie également l'office allemand d'échanges universitaires (German Academic Exchange Service ou DAAD) pour l'octroi d'une allocation complémentaire au cours de la période septembre 2011 à septembre 2014 (3 ans), en particulier Madame Angela HELFER pour tous les aspects administratifs. Je remercie aussi l'Union Economique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) pour son soutien financier pour certaines missions de terrain à travers le projet de recherche UEMOA-HYDROLOGIE porté par 2iE.

Ma profonde gratitude va à mon directeur de thèse, Monsieur Harouna KARAMBIRI, Maître de Conférences à 2iE, qui m'a fait confiance depuis mon Master Spécialisé en « Gestion Intégrée des Ressources en Eau » et grâce à qui j'ai pu acquérir de l'expérience en matière de recherches à travers le poste d'Ingénieur de Recherche et qui, en dépit de ses multiples responsabilités en sa qualité de Directeur de l'Ecole Doctorale, a accepté de diriger ce travail, m'accordant ainsi le privilège de bénéficier de ses conseils, de ses remarques, de son analyse critique et surtout de sa rigueur scientifique. Je ne saurai trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude, mais qu'il trouve, au-delà de ces lignes, la marque de mon respect et l'expression de mon admiration.

Ma reconnaissance va à Monsieur Jean-Emmanuel PATUREL, Chargé de Recherche à l'IRD/HSM, qui est resté disponible tout au long cette thèse. Je ne peux que saluer la clairvoyance de ses opinions scientifiques. Il a su par ses idées, ses explications et ses critiques, alimenter l'âme de ce travail de recherche. Il a également accepté de faire partie du jury de cette soutenance en qualité d'examineur. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Je tiens à remercier les membres du jury. Monsieur Dapola Evariste Constant DA, Professeur à l'Université de Ouagadougou qui m'a fait honneur de présider le jury de cette thèse. Messieurs Pierre RIBSTEIN, Professeur à l'Université Pierre et Marie CURIE (Paris VI) et Albert GOULA BI TIE, Professeur à l'Université Nangui ABROGOUA, m'ont fait le plaisir d'accepter de rapporter cette thèse. Je leur suis reconnaissant d'avoir apporté un regard extérieur et des commentaires pertinents sur mon travail. Toute ma gratitude s'adresse à Monsieur Abel AFOUDA, Maître de Conférences à l'Université d'Abomey-Calavi, qui a accepté d'être l'un des examinateurs de cette thèse.

Le comité de suivi de thèse comprenait également Dr. Jean-Christophe POUSSIN, chercheur à l'IRD/G-Eau et Dr. Philippe CECCHI, chercheur à l'IRD. Je les remercie pour avoir accepté de suivre mes travaux. Leurs conseils et leurs critiques ont été très utiles.

Je tiens à remercier tout particulièrement Dr. Boubacar IBRAHIM, chercheur à WASCAL, mon conseiller d'études, ses remarques et conseils m'ont été précieux. Je lui suis profondément reconnaissant et je lui garde tout mon amitié.

Une partie de ce travail doit également beaucoup à Dr. Issam NOURI de l'INAT et à son expertise dans le développement des outils d'aide à la décision pour la gestion des systèmes de ressources en eau. Je lui suis profondément reconnaissant pour sa contribution significative à la conception et à l'élaboration de mon modèle d'optimisation.

J'ai eu le plaisir de pouvoir profiter de l'appui du Dr. Johan OSZWALD de l'Université de Rennes, qui m'a initié au traitement des images satellitaires.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur Hamma YACOUBA, Directeur de la Recherche à 2iE et chef du Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH) de m'avoir accueilli au sein de ce laboratoire.

J'exprime aussi ma reconnaissance à tous les membres de l'équipe LEAH. Leurs encouragements et leurs avis ont été très utiles dans la conduite de ma recherche. En particulier: Dr. Lawani MOUNIROU pour son aide efficace dans le traitement des données ; Dr. Mahamadou KOITA pour sa contribution et son appui aux travaux de géophysique sur le terrain ; Dr. Dial NIANG, Monsieur Amadou SIMAL et Mathieu KABORE technicien à LEAH pour leur contribution inestimable pendant les séjours d'équipement du site de recherche et de collecte des données. Un clin d'œil à Monsieur Marcelin KOUAKOU pour ses encouragements et son soutien. Je remercie de même tous les membres des autres équipes de recherche de 2iE qui n'ont cessé de m'encourager au quotidien sur ce trajet fastidieux et surtout pendant la période de turbulence. Je pense à Dr. Awa KOITA, Dr. Daniel YAMEGUEU et Dr. Abdoulaye DIARRA. Je pense aussi à d'autres compagnons qui sont passés par 2iE : Dr. Stéphanie MAIGA/YALEU et Dr. Parfait TATSIDJODOUNG.

Ces années de thèse n'auraient pas été aussi agréables sans la convivialité de mes collègues doctorants de 2iE. Je pense notamment à Abdouramane, Tadjouwa, Noellie, Drissa, Aïda, David, Eric. Merci d'avoir su créer cette atmosphère qui a contribué à mon épanouissement dans le travail. Que dis-je des rigolades autour de nos plats de riz gras au resto. Merci également à Génévieve secrétaire de l'école doctorale pour sa gentillesse et sa disponibilité. Un grand merci à Katherine pour avoir révisé mes documents en anglais.

Je remercie aussi les jeunes chercheurs que j'ai rencontrés à l'INAT et qui ont rendu mon séjour à Tunis si agréable : Amal, Mariam, Ben et Nour.

Je tiens à remercier mon observateur des stations de mesure Moïse NADIE, car sans lui il n'y aurait pas eu certaines données journalières. Un grand merci aux membres des différents groupements (Corikab, Toumhositi, pêcheurs, Piame) qui exploitent le réservoir de Boura ainsi qu'à toute la population de la localité de Boura pour leur hospitalité et pour avoir contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail.

Un vibrant hommage à mes regrettés parents papa Louis TAZEN et maman Marie-Claire MEGNE pour le sens de dévouement qu'ils m'ont inculqué. Je remercie également tous les membres des familles MAKAM et SOUP FONGANG, qu'ils retrouvent la résultante de tout le sérieux qui m'a souvent caractérisé.

Je voudrais remercier toute ma belle-famille M & Mme TALEGHANG, M. & Mme LONKO, M. & Mme TEBOH, Aurel, Fabrice et Élise pour leur soutien inconditionnel.

Un merci particulier à la famille NGONGANG Prince pour son soutien multiforme et ses encouragements.

J'aimerais aussi exprimer ma gratitude envers mes amis de parcours et de lutte à savoir : Roger KEUMO, Alain FOTUE, Pascal DJEMMO, Jérémie DANGA, Roméo TEDONGAP,

Mathurin KEUTE et Eric FOUTE ainsi que leurs familles respectives pour le sens du combat que nous avons développé.

Mes remerciements vont également à toute la communauté Camerounaise du Burkina Faso qui a, de près ou de loin, contribué à ce travail. Je pense à mes amis de l'Association des Ingénieurs Camerounais diplômés de 2iE (AIC-2iE) et à leurs familles respectives pour leur soutien.

Enfin, que tous ceux qui m'ont aidé par leur travail et parfois réconforté de leur amitié et de leur soutien trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Merci à tous
FOWE TAZEN

RÉSUMÉ

Au cours des prochaines décennies, le changement climatique, ainsi que les développements socio-économiques des pays, vont accentuer davantage les contraintes sur les ressources en eau, déjà insuffisantes, dans la zone soudano-sahélienne de l’Afrique de l’Ouest. A cet égard, une meilleure connaissance des ressources en eau dans cette zone est primordiale pour une gestion rationnelle et durable.

Cette étude, qui s’inscrit dans le programme « Challenge Program on Water and Food » du bassin de la Volta, vise à caractériser le fonctionnement hydrologique des petits réservoirs et à développer une plateforme de gestion optimisée de ces ouvrages hydrauliques dans un contexte multi-usages. Le barrage de Boura, situé dans la zone soudanienne du Burkina Faso, est un site pilote représentatif de l’ensemble des petits réservoirs du bassin de la Volta en Afrique de l’Ouest soumis aux mêmes contraintes. De ce fait, pour fournir un état des lieux de la situation actuelle de la dynamique de remplissage et de vidange du réservoir, nous avons établi le bilan hydrologique du réservoir de Boura. Certaines composantes de ce bilan ont été estimées à travers une approche basée sur le principe de conservation des volumes. Les données obtenues ont servi d’une part à calibrer un modèle hydrologique (modèle GR4J) et un modèle d’allocation de l’eau (modèle WEAP), et d’autre part à tester l’outil d’optimisation élaboré à l’aide des méthodes évolutionnaires (algorithme génétique mono-objectif) pour la gestion des réservoirs sous différentes contraintes. Les modèles GR4J et WEAP calés ont permis respectivement de faire des projections sur les apports du bassin versant en amont du barrage de Boura et de simuler le système modélisé sous les scénarios de changement climatique issues du modèle climatique régional RCA4 (sous les scénarios d’émission RCP4.5 et RCP8.5). Un ensemble d’indices de performance ont servi à évaluer la performance du système à partir des sorties de WEAP pour différents horizons de gestion (trois périodes de 30 ans chacune).

Le bilan global du réservoir de Boura sur les 2 années de suivi hydrologique a indiqué que : de l’eau mobilisée par le réservoir, 60% s’évaporent, 24% s’infiltrent et 19% sont prélevés pour satisfaire les demandes, en particulier les demandes d’irrigation. Ainsi, une faible proportion des volumes d’eau mobilisés est destinée aux usages actuels. Cette analyse confirme l’utilisation non optimale du réservoir de Boura.

L’application de l’outil de gestion développé au cas réel du système modélisé de Boura a montré son efficacité à générer des fournitures optimales en eau destinées à satisfaire au

mieux les besoins d'irrigation selon le problème formulé. La performance de cet outil dépend fortement de la qualité des données en entrée. L'outil développé peut contribuer à l'amélioration de la gestion des ressources en eau des systèmes de petits réservoirs au Burkina Faso, voire en Afrique.

L'analyse des changements sur les pluies moyennes annuelles et l'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle entre les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) et la période de référence 1971-2000 a montré des tendances à la hausse avec des augmentations allant jusqu'à 23% et 9% respectivement sur les pluies et l'ETP dépendant du scénario RCP4.5 ou RCP8.5 considéré.

Ces hausses des pluies et de l'ETP projetées se traduiront par une forte variabilité interannuelle des apports futurs d'eau au réservoir de Boura, ce qui pourrait nécessiter un rehaussement de la digue pour répondre aux exigences des demandes futures en eau d'irrigation. Cependant, les indices de performance du système modélisé ont montré qu'on pourrait observer des défaillances dans la satisfaction des demandes agricoles en eau dans le futur. En termes de performance globale, les critères de fiabilité et vulnérabilité seront affectés par le changement climatique, surtout en cas d'un accroissement de la demande quel que soit le scénario RCP4.5 ou RCP8.5 considéré. A cet effet, des propositions ont ainsi été faites pour une gestion améliorée de l'hydro-système de Boura.

Mots-clés : bilan hydrologique, changement climatique, gestion des réservoirs, optimisation des petits réservoirs, Burkina Faso, bassin de la Volta, Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

In the coming decades, climate change and socio-economic development of countries will likely place more stress on the already limited water resources in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. In this context, an improved knowledge and understanding of water resources in this region is therefore a key issue for their rational and sustainable management.

This study, which is part of the "Challenge Program on Water and Food" in the Volta Basin, aims to characterize the hydrological operation of small reservoirs and to develop an optimized management platform for such hydraulic infrastructures in a multiple uses context. The Boura dam, located in the Sudanian zone of Burkina Faso, is a representative pilot site of many small reservoirs in the Volta Basin in West Africa which are subject to the same constraints. Thus, to provide the current state of the dynamic filling and emptying of the reservoir, we established the hydrological balance of Boura reservoir. Some components of the water balance were estimated through an approach based on the volumes conservation equation. The resulting time series data were used to calibrate a hydrological model (GR4J model) and a water allocation model (WEAP model), and were also used to test an optimization tool developed using evolutionary methods (single objective genetic algorithms) for reservoir management under constraints. GR4J and WEAP models, respectively, were then used to project runoff from the watershed upstream of Boura dam, and to simulate the operation of Boura reservoir under the climate change scenarios using the RCA4 model (under the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios). A set of performance indices was used to assess the performance of the system from the outputs of WEAP for different future periods of management (three periods of 30 years each).

The global water balance of Boura reservoir during the 2 year on-site monitoring indicated that of the water retained by the reservoir: 60% was evaporated, 24% infiltrated, and 19% was withdrawn for various uses, particularly for agricultural irrigation. Thus, a low proportion of the water stored in Boura reservoir is withdrawn for current uses. Therefore, the irrigation potential of this small reservoir is underutilized. This analysis is in agreement with the non optimal operation of Boura reservoir.

Using the reservoir management tool developed for the case study of Boura dam indicated the tool's effectiveness for generating optimal water allocation for irrigation needs according to the formulated problem. The performance of this tool is strongly dependent on the accuracy

of the input data. The developed tool can contribute to the improvement of management of water resources for small reservoir systems not only in Burkina Faso but also in Africa.

The analysis of the inter-annual average changes in rainfall and potential evapotranspiration (PET) between the future for the three 30 year horizons (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100) and the reference period (1971-2000) showed upward trends with increases up to +23% and +9% in rainfall and PET respectively, dependent on the RCP emission scenario (RCP4.5 or RCP8.5).

These projected changes in rainfall and PET will cause higher inter-annual variability of future inflow to the Boura reservoir compared to the reference period, necessitating increased reservoir capacity to meet future irrigation water demands. However, the performance indices of system revealed that failures in agricultural water demand satisfaction would be observed in the future periods. In terms of overall performance, the reliability and vulnerability indices decreased in the future relative to the reference period, especially for the socio-economic development scenario with an increase in agricultural water demand under climate change conditions. For this purpose, proposals have been made for improved management of Boura hydrosystem.

Key-words: water balance, climate change, reservoir management, small reservoirs optimization, Burkina Faso, Volta Basin, West Africa.

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles

1. **T. FOWE**, H. KARAMBIRI, J-E. PATUREL, J-C. POUSSIN, P. CECCHI (2015) “Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso”, *Agricultural Water Management*, 152, 99-109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006> .
2. **T. FOWE**, I. NOURI, B. IBRAHIM, H. KARAMBIRI, J-E. PATUREL (2015) “OPTIWAM: An intelligent tool for OPTimizing Irrigation WATER Management in reservoir-groundwater system”, *Water Resources Management*, 29, 3841-3861 <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1032-9>

Actes des colloques ou conférences

1. **T. FOWE**, B. IBRAHIM, I. NOURI, H. KARAMBIRI, J-E. PATUREL (2015) “Impacts des changements climatiques sur les apports et les demandes en eau agricole dans le bassin versant du barrage de Boura au Burkina Faso”. 6^{ème} Colloque International: Ressources en Eau et Développement Durable, Alger-Algérie.
2. **FOWE T.**, KARAMBIRI H., PATUREL J-E. (2013) “Modélisation du fonctionnement hydrique du barrage-réservoir de Boura, Burkina Faso : Application du modèle WEAP”. 7^{ème} édition Journées Scientifiques de 2iE, Ouagadougou-Burkina Faso.
3. **T. FOWE**, H. KARAMBIRI, J-E. PATUREL, J-C. POUSSIN, P. CECCHI (2013) “Hydrological balance of the Boura dam, Burkina Faso”. VBDC science workshop, Ouagadougou-Burkina Faso.
4. **TAZEN FOWE**, H. KARAMBIRI, J-E.PATUREL, B. IBRAHIM (2012) “Prédétermination des écoulements sur le bassin versant non jaugé du barrage de Boura au Burkina Faso”. Colloque International Enseignement, Science et Technologie pour le Développement de l’Afrique, Dakar-Sénégal.

Contributions aux publications

1. J.-C. POUSSIN, L. RENAUDIN, D. ADOGOBA, A. SANON, **T. FOWE**, W. DOGBE, J.-L. FUSILLIER, B. BARBIER, P. CECCHI (2015) “Performance of small reservoir irrigated schemes in the Upper Volta basin: Case studies in Burkina Faso and Ghana” *Water Resources and Rural Development*, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.wrr.2015.05.001> .
2. CECCHI P., POUSSIN J.-C., GONZALEZ C., SOLERI R., SPINELLI S., DIAKITE C., **FOWE T.**, KARAMBIRI H., PATUREL J.-E., SANOU K., NAPON K., BAMBA D., SANOGO S., FUSILLIER J.-L., JAMIN J.-Y. (2015) “The invasion of a West African small reservoir by a macrophyte: how a weed became a seed” *Hydrobiologia*, (accepted).
3. KARAMBIRI, H., **FOWE, T.**, BARBIER, B., SOME, Y.S.C., IBRAHIM, B., YACOUBA, H., DIARRA, A., (2012) “Hydrological characterization of the sites of Boura (Burkina Faso) and Binaba II (Ghana)” In: Technical Report of Challenge Program on Water and Food.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
LISTE DES PUBLICATIONS.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	x
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	xiv
LISTE DES VARIABLES.....	xvi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Contexte général sur les ressources en eau en Afrique de l’Ouest.....	2
1.2 Problématique des petits barrages.....	3
1.3 Présentation du “ <i>Challenge Program on Water and Food</i> ”.....	6
1.4 Objectifs de la thèse.....	7
1.5 Description sommaire des méthodes de l’étude.....	7
1.6 Structuration de la thèse.....	8
CHAPITRE 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LES BARRAGES-RÉSERVOIRS ET LEUR CADRE DE GESTION.....	11
2.1 Quelques définitions.....	12
2.1.1 Barrage.....	12
2.1.2 Réservoir ou retenue.....	12
2.2 Fonctions et caractéristiques géométriques des barrages-réservoirs.....	13
2.2.1 Fonctions des barrages-réservoirs.....	13
2.2.2 Caractéristiques géométriques des barrages-réservoirs.....	14
2.3 Etat des lieux des ouvrages de mobilisation des ressources en eau au Burkina Faso ..	14
2.3.1 Typologie des ouvrages de mobilisation des ressources en eau et des aménagements hydro-agricoles.....	15
2.3.2 Situation des ouvrages de mobilisation au Burkina Faso.....	16
2.4 Avantages et inconvénients des barrages.....	18
2.4.1 Aspects positifs associés aux barrages.....	18
2.4.1.1 Usages consommateurs d’eau.....	19
2.4.1.2 Usages non consommateurs d’eau.....	20
2.4.2 Impacts négatifs associés aux barrages.....	22
2.4.2.1 Impacts environnementaux.....	22
2.4.2.2 Impacts hydrologiques.....	23
2.4.2.3 Impacts socio-économiques et sanitaires.....	24
2.5 Méthodes de gestion des barrages.....	25
2.5.1 Méthodes classiques de gestion des barrages.....	25
2.5.1.1 Méthode du fil tendu.....	25
2.5.1.2 Méthode de la courbe objectif de remplissage.....	26

2.5.2 Méthodes opérationnelles.....	28
2.5.2.1 Méthodes d'optimisation.....	28
2.5.2.2 Modèles de simulation.....	32
2.5.3 Méthode de gestion intégrée des ressources en eau au Burkina Faso.....	34
CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA ZONE D'ÉTUDE	37
3.1 Cadre naturel et physique	38
3.1.1 Situation géographique de la zone d'étude.....	38
3.1.2 Régime climatique.....	39
3.1.2.1 Etude de la pluviométrie.....	40
3.1.2.2 Autres paramètres climatiques.....	42
3.1.3 Description de l'hydro-système.....	44
3.1.3.1 Bassin versant en amont du barrage de Boura.....	44
3.1.3.2 Aménagements hydro-agricoles.....	52
3.2 Cadre humain et socio-économique de la zone d'influence du barrage de Boura	58
3.2.1 Historique du village de Boura.....	58
3.2.2 Population de Boura	58
3.2.3 Activités économiques.....	59
3.2.3.1 Agriculture	59
3.2.3.2 Elevage.....	60
3.2.3.3 Pêche.....	60
3.2.3.4 Marchés.....	61
CHAPITRE 4 : BILAN HYDROLOGIQUE DU RÉSERVOIR DE BOURA	63
4.1 Importance des études de bilans hydrologiques	64
4.2 Matériels et méthodologie d'estimation des termes du bilan de la retenue de Boura..	65
4.2.1 Equipement hydrométéorologique	65
4.2.2 Données disponibles et incertitudes liées à leur mesure.....	67
4.2.2.1 La pluie	67
4.2.2.2 Evaporation du bac.....	67
4.2.2.3 Suivi du barrage.....	69
4.2.3 Méthodologie d'estimation des termes du bilan hydrologique	71
4.2.3.1 Pertes naturelles au niveau du réservoir de Boura	71
4.2.3.2 Pertes par prélèvement pour divers usages	75
4.2.3.3 Apports.....	79
4.2.4 Incertitudes sur les termes du bilan hydrologique	80
4.3 Résultats et interprétation des termes du bilan hydrologique	81
4.3.1 Variations du niveau du réservoir.....	81
4.3.2 Analyse des précipitations et de l'évaporation.....	84
4.3.2.1 Analyse des précipitations	84
4.3.2.2 Analyse de l'évaporation	86
4.3.3 Déversement et pertes par infiltration	88
4.3.3.1 Déversement.....	88
4.3.3.2 Pertes par infiltration.....	89
4.3.4 Prélèvements au niveau du réservoir	91
4.3.5 Volumes ruisselés sur le bassin amont du réservoir de Boura	93
4.3.6 Récapitulatif des termes du bilan hydrologique et incertitudes associées.....	95
CHAPITRE 5 : MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DU RESERVOIR DE BOURA	99
5.1 Modélisation globale des apports dans le réservoir de Boura : le modèle GR4J	101

5.1.1 Description du modèle GR4J.....	101
5.1.2 Calage du modèle GR4J.....	103
5.1.3 Analyse de la sensibilité du modèle GR4J.....	106
5.2 Modélisation de la demande en eau agricole.....	108
5.2.1 Besoins en eau des cultures.....	108
5.2.2 Coefficients culturaux.....	108
5.2.3 Besoins en eau d'irrigation.....	109
5.3 Reconstitution des flux évaporés et infiltrés au niveau du réservoir de Boura	110
5.3.1 Reconstitution des flux évaporés : loi linéaire.....	110
5.3.2 Reconstitution des infiltrations : loi de puissance.....	112
5.4 Modélisation de l'allocation d'eau du réservoir de Boura par WEAP.....	113
5.4.1 Description du modèle WEAP.....	113
5.4.2 Elaboration du schéma conceptuel de fonctionnement du système étudié.....	114
5.4.3 Simulation du fonctionnement de la retenue de Boura.....	115
CHAPITRE 6 : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'OPTIMISATION DE LA GESTION DU RÉSERVOIR DE BOURA	121
6.1 Problématique et objectifs de gestion du réservoir	122
6.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation de la gestion	123
6.2.1 Elaboration des fonctions objectifs.....	123
6.2.2 Expression des contraintes.....	125
6.3 Elaboration du prototype du système à optimiser.....	127
6.4 Mise en œuvre de l'algorithme génétique.....	128
6.4.1 Fonction d'adaptation.....	128
6.4.2 Fonctions de pénalité associées aux limites des capacités du réservoir.....	129
6.4.3 Structuration du programme d'optimisation sous Visual Basic.....	130
6.5 Indicateurs de la performance du système de gestion.....	131
6.5.1 Incidents ou défaillances du système de gestion.....	132
6.5.2 Critères de performance du système de gestion.....	132
6.5.2.1 <i>Courbes de stock du réservoir</i>	132
6.5.2.2 <i>Critères fiabilité-résilience-vulnérabilité</i>	133
6.6 Analyse des résultats de l'application de l'AG : cas sans le réservoir souterrain	133
6.6.1 Evolution des fonctions critères.....	133
6.6.2 Fournitures optimales pour la satisfaction des demandes en eau.....	134
6.6.3 Evolution de la courbe de stock optimal sans la source souterraine.....	135
6.7 Evaluation de la performance du modèle de gestion.....	136
6.8 Stratégie de la gestion optimale avec les eaux souterraines comme sources alternatives	139
6.9 Analyse des résultats de l'application de l'AG : prise en compte d'un réservoir souterrain	142
6.9.1 Evolution de la courbe optimale de stock avec l'aquifère comme source alternative..	142
6.9.2 Evaluation de la performance du modèle de gestion avec l'aquifère comme source alternative.....	143
CHAPITRE 7 : IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RÉSERVOIR DE BOURA.....	149

7.1 Contexte des changements climatiques en Afrique de l’Ouest.....	150
7.2 Approche générale de l’étude des impacts du changement climatique	151
7.3 Mise en évidence et correction des biais des données du modèle régional RCA4	154
7.3.1 Mise en évidence des biais	154
7.3.2 Méthodes de correction des biais	157
7.3.2.1 <i>Correction des précipitations.....</i>	<i>157</i>
7.3.2.2 <i>Correction de l’évapotranspiration potentielle</i>	<i>159</i>
7.3.3 Correction des biais sur les précipitations et l’évapotranspiration potentielle	160
7.4 Analyse des variables climatiques corrigées	162
7.4.1 Evolution des précipitations	162
7.4.2 Evolution de l’évapotranspiration potentielle.....	165
7.5 Simulation des apports futurs et demandes futures en eau agricoles à Boura	168
7.5.1 Simulation des apports futurs dans le réservoir de Boura	168
7.5.2 Projections futures des demandes en eau agricoles	169
7.6 Etudes des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les demandes en eau agricoles.....	169
7.6.1 Impacts sur les ressources en eau	169
7.6.2 Impacts sur les demandes en eau agricoles	172
7.7 Simulation du réservoir de Boura en climat futur avec WEAP.....	175
7.7.1 Scénarios de développement et mode de gestion	175
7.7.2 Résultats des simulations des scénarios de développement et impacts du changement climatique sur les indices de performance du réservoir	176
7.7.3 Propositions pour une gestion améliorée de l’hydro-système de Boura	186
CHAPITRE 8 : CONCLUSION GÉNÉRALE – PERSPECTIVES.....	189
8.1 Synthèse des résultats.....	190
8.2 Perspectives de recherche	194
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	197
LISTE DES FIGURES.....	218
LISTE DES TABLEAUX	221
ANNEXES.....	224

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

AE :	Algorithme Evolutionnaire
AG :	Algorithme Génétique
AQUASTAT :	Système Mondial d'Information sur l'Eau de la FAO
AS :	Analyse de Sensibilité
ASTER :	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AUE :	Association d'Usagers de l'Eau
BAD :	Banque Africaine de Développement
CEA-AO :	Commission Economique pour l'Afrique - Bureau Afrique de l'Ouest
CEDEAO :	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CGIAR :	Consultative Group on International Agricultural Research
CIGB :	Commission Internationale des Grands Barrages
CILSS :	Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CLE :	Comité Local de l'Eau
CMIP5 :	Coupled Model Intercomparison Project
CORDEX :	Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment
CORIKAB :	Coopérative Rizicole Kaman NADIE de Boura
CORINE :	COordination Régionale de l'Information sur l'Environnement
CPWF :	Challenge Program on Water and Food
CSAO :	Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest
DEIE :	Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
DGH :	Direction Générale de l'Hydraulique
DGRE :	Direction Générale des Ressources en Eau
ERSDAC :	Earth Remote Sensing Data Analysis Center
ESM :	Earth System Model
ETP :	EvapoTanspiration Potentielle
FAO :	Food and Agriculture Organization
FEME :	Fédération des Eglises et Missions Evangéliques
FIT :	Front Inter-Tropical
FMI :	Fonds Monétaire International
GDEM :	Global Digital Elevation Model
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evaluation du Climat
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GLCF :	Global Land Cover Facility
GR4J :	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
HSM :	HydroSciences Montpellier
IFAD :	International Fund for Agricultural Development
IGN :	Institut Géographique National
2iE :	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
INAT :	Institut National d'Agronomie de Tunisie
IPCC :	Intergouvernemental Panel on Climate Change

IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
IWACO :	International WATER CONSULT
MAH :	Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique
MAHRH :	Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques
MCG :	Modèle Climatique Global
MCR :	Modèle Climatique Régional
MEE :	Ministère de l'Environnement et de l'Eau
Mm³ :	Millions de mètres cubes
MPI-ESM-LR :	Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution
NS :	Nash-Sutcliffe
OCDE :	Organisation pour la Coopération et le Développement Economique
OEP :	Optimisation par Essaim Particulaire
OLI-TIRS :	Operational Land Imager-Thermal InfraRed Sensor
ONBAH :	Office National des Barrages et des Aménagements Hydro-agricoles
ONBI :	Office National des Barrages et de l'Irrigation
ONG :	Organisation Non Gouvernementale
OPTIWAM :	OPTimization Irrigation WATER Management
ORSTOM :	Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer
PAGIRE :	Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PBIAS :	Percent Bias
PCD :	Plan Communal de Développement
PD :	Programmation Dynamique
PIAME :	Projet d'Intensification Agricole par la Maîtrise de l'Eau
PL :	Programmation Linéaire
PNGT2 :	Programme National de Gestion des Terroirs
PNL :	Programmation Non Linéaire
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RCA4 :	Rosby Centre Atmosphere model
RCP :	Representative Concentration Pathways
RESO :	Ressources en Eau du Sud-Ouest
ROA :	Regional Office for Africa
SMHI :	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SYSMIN :	Programme de cartographie géologique et minière
TRE :	Tomographie de Résistivité Electrique
UBT :	Unité du Bétail Tropical
UEMOA :	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine
UICN :	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UNESCO :	United Nations Educational Scientific and cultural Organization
VBDC :	Volta Basin Development Challenge
WASCAL :	West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use
WCD :	World Commission Dams
WEAP :	Water Evaluation and Planning System
ZCIT :	Zone de Convergence Inter-Tropicale

LISTE DES VARIABLES

Symbole	Désignation	Unité
A^{cp}	Superficie mise en valeur pour la culture "cp"	[ha]
$A_{d,cp}$	Superficie de la culture "cp" sur le site "d"	[ha]
A_r	Superficie du plan d'eau du réservoir	[ha]
BN	Besoin net en eau d'irrigation	[mm]
BP_d	Besoin en eau à la parcelle au site de demande "d"	[mm]
D^{cp}	Demande en eau d'irrigation pour la culture "cp"	[m ³]
Dd	Densité de drainage	[km km ⁻²]
D_d	Demande en eau d'irrigation au site "d"	[m ³]
d_j	Durée du j ^{ème} épisode défaillant	[mois]
DP(d,a)	Percolation du site de demande "d" vers l'aquifère "a"	[m ³]
Ds	Dénivelée spécifique	[m]
e_a	Pression partielle de vapeur d'eau	[kPa]
E_{bac}	Taux d'évaporation au niveau du bac	[mm jour ⁻¹]
E_{ret}	Taux d'évaporation au niveau du réservoir	[mm Δt ⁻¹]
e_s	Pression de vapeur saturante	[kPa]
ETc	Evapotranspiration culturale	[mm]
ETM_{cp}	Evapotranspiration maximale de la culture "cp"	[m ³ ha ⁻¹]
ETP	Evapotranspiration de référence	[mm jour ⁻¹]
fc	Fonction coût de l'eau	[-]
f_{Env}	Fonction environnementale	[-]
Fia_t	Fiabilité basée sur le temps	[%]
f_k	k ^{ème} fonction objectif	[-]
F_{max}	Capacité maximale de prélèvement par la vanne	[m ³]
F_{max}D_{gw,d}	Fourniture maximale d'eau de l'aquifère "gw" pour le site "d"	[m ³]
F_{max}D_{sw,d}	Fourniture maximale d'eau de la source "sw" pour le site "d"	[m ³]
F_{min}	Capacité minimale de prélèvement par la vanne	[m ³]
f_{NDS}	Fonction de non satisfaction des besoins en eau agricoles	[-]
f_{NR}	Fonction de non remplissage du réservoir de surface	[-]
F_{sw,d}	Fourniture d'eau de la source de surface "sw" pour le site "d"	[m ³]
F_{sw,d}	Fourniture d'eau de la source souterraine "gw" pour le site "d"	[m ³]
f_{WP}	Fonction de la productivité physique de l'eau	[-]
G	Densité du flux de chaleur du sol	[MJm ⁻² jour ⁻¹]
H	Charge hydraulique	[m]
h_d	Charge sur le déversoir	[m]
h_{max}	Cote du plan d'eau normal	[m]
h_{min}	Cote de la prise d'eau du réservoir	[m]
HR_{max}	Humidité relative maximale	[%]
HR_{min}	Humidité relative minimale	[%]
i_d	Fraction des pertes d'eau à la parcelle par percolation	[%]
I_f	Taux d'infiltration au niveau du réservoir	[mm Δt ⁻¹]

I_g	Indice global de pente	[m km ⁻¹]
I_{se}	Flux entrants dans le réservoir "se"	[m ³ Δt ⁻¹]
I^t	Apports dans le réservoir entre les dates t-Δt et t	[m ³]
K^h	Conductivité hydraulique du milieu	[m s ⁻¹]
k	Coefficient de surestimation ou de sous-estimation de la pluie	[%]
K_{bac}	Coefficient de transposition	[-]
K_c	Coefficient cultural	[%]
K_G	Coefficient de Gravelius	[-]
K_r	Coefficient de ruissellement annuel	[%]
k_{vcp}	Facteur de stress hydrique de la culture "cp"	[-]
L_i	Longueur du i ^{ème} cours d'eau	[km]
L_r	Longueur du rectangle équivalent	[km]
l_r	Largeur du rectangle équivalent	[km]
L_d	Longueur du déversoir	[m]
M	Nombre d'épisodes de défaillances	[-]
m_d	Coefficient de débit moyen	[m ^{1/2} s ⁻¹]
N_{cp}	Nombre total de cultures	[-]
ND	Nombre de sites de demande en eau	[-]
Ngw	Nombre d'aquifères	[-]
N_s	Nombre de mois correspondant aux états satisfaisants du système	[-]
N_{sw}	Nombre de sources d'eau de surface	[-]
NT	Nombre total de mois correspondant à l'horizon de gestion	[-]
O_{se}	Flux sortants du réservoir "se"	[m ³ Δt ⁻¹]
O^t	Volume sortant du réservoir entre les dates t-Δt et t	[m ³]
P	Hauteur de la pluie	[mm]
P_{bv}	Périmètre du bassin versant	[km]
P_{eff}	Pluie efficace	[mm]
P_j	Pluie journalière	[mm jour ⁻¹]
p_i	Probabilité d'occurrence du j ^{ème} épisode défaillant	[-]
Pu_{gw,d}	Prix unitaire de fourniture d'eau au site "d" à partir de l'aquifère "gw"	[FCFA m ⁻³]
Pu_{max}	Prix unitaire maximal de fourniture d'eau à partir des sources	[FCFA m ⁻³]
Pu_{sw,d}	Prix unitaire de fourniture d'eau au site "d" à partir de la source "sw"	[FCFA m ⁻³]
Q	Débit journalier	[m ³ s ⁻¹]
Q^{obs}	Débit journalier observé	[m ³ s ⁻¹]
Q^r	Pertes au niveau du réservoir	[m s ⁻¹]
Q^{sim}	Débit journalier simulé	[m ³ s ⁻¹]
R_a	Rayonnement extraterrestre	[mm jour ⁻¹]
Res_H	Résilience	[mois ⁻¹]
R_n	Rayonnement net à la surface de la terre	[MJ m ⁻² jour ⁻¹]
S_{bv}	Superficie du bassin versant	[km ²]
T	Horizon temporel de gestion	[mois]

T'	Température de l'air à 2 m du sol	[°C]
T_{max}	Température maximale	[°C]
T_{mean}	Température moyenne	[°C]
T_{min}	Température minimale	[°C]
T_r	Température au point de rosée	[°C]
u₂	Vitesse du vent à 2 m du sol	[m s ⁻¹]
V_d	Volume déversé	[m ³]
V_e	Volume évaporé du réservoir	[m ³]
V_i	Volume infiltré au niveau du réservoir	[m ³]
V_{i_sw}	Volume infiltré du réservoir "sw" vers l'aquifère	[m ³]
V_{ini_se}	Volume initial de la source "se"	[m ³]
Viol_{max}V_{max}	Violation maximale de la pénalité de violation de la capacité maximale du réservoir	[-]
Viol_{max}V_{min}	Violation maximale de la pénalité de violation de la capacité minimale du réservoir	[-]
V_{max}	Capacité maximale du réservoir	[m ³]
V_{max_sw}	Volume maximal de la source de surface "sw"	[m ³]
V_{min}	Capacité morte du réservoir	[m ³]
V^{obs}	Volume observé du réservoir	[m ³]
V_p	Volume précipité directement dans le réservoir	[m ³]
V_{rs}	Apports par ruissellement dans le réservoir	[m ³]
V^{sim}	Volume simulé du réservoir	[m ³]
V_{sw}	Volume de la source de surface "sw"	[m ³]
V^t	Volume stocké dans le réservoir à la date t	[m ³]
V^{t-Δt}	Volume stocké dans le réservoir à la date t-Δt	[m ³]
V_u	Volume prélevé du réservoir	[m ³]
Vul_H	Vulnérabilité	[m ³]
WP	Productivité physique de l'eau sur l'horizon de gestion	[kg m ⁻³]
WP_{max}	Productivité physique maximale de l'eau	[kg m ⁻³]
w_q	Coefficient de pondération des fonctions objectifs	[-]
x_i	variable décisionnelle du problème	[-]
Y_{d,cp}	Rendement de la culture "cp" sur le site "d"	[kg ha ⁻¹]
Y_{max_cp}	Rendement maximal de la culture "cp"	[kg ha ⁻¹]
α	Participation du premier parent dans les solutions créées	[%]
α_d	Efficiencce de l'irrigation sur le site de demande "d"	[%]
γ	Constante psychrométrique	[kPa °C ⁻¹]
Δ	Pente de la courbe de la tension de vapeur saturante	[kPa °C ⁻¹]
δ(X)	Erreur absolue associée à X	[m ³]
Δh	Variation de cote du réservoir	[mm Δt ⁻¹]
Δt	pas de temps de gestion	[mois]
ΔV	Variation du volume stocké du réservoir entre 2 dates	[m ³]
ε_X	Erreur relative associée à X	[%]
u_j	Plus grand écart à l'objectif constaté	[m ³]
ω_{cp}	Coefficient de pondération des cultures	[-]

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE



1.1 Contexte général sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest

Les ressources en eau constituent l'une des ressources naturelles les plus importantes pour la survie de l'humanité et le développement socio-économique des nations (FAO/ROA, 2001; Odada, 2006). En Afrique de l'Ouest, les perturbations climatiques caractérisées par de longues sécheresses se sont accentuées depuis le début des années 1970. Cette péjoration climatique durable et prononcée, a eu pour corollaire, entre autres, une rupture nette des caractéristiques moyennes des séries pluviométriques et une modification du régime des précipitations (Servat et al., 1997; L'Hote et al., 2002; Paturel et al., 2003; CEDEAO-CSAO/OCDE, 2008) se traduisant par une baisse de la pluviosité moyenne annuelle de 20 à 40% entre 1931-1960 et 1968-1990 (IPCC, 2007). L'un des impacts de ces changements climatiques combinés aux pressions anthropiques sur les bassins versants ouest africains et leurs bas-fonds est l'altération de la disponibilité de la ressource en eau ainsi que sa distribution spatio-temporelle (Cecchi, 2007; Descroix et al., 2009; Favreau et al., 2009; Karambiri et al., 2011). En effet, une chute des débits moyens annuels des grands fleuves de la région de l'ordre de 30 à 60% a été observée dans la région (Ardoin-Bardin, 2004; Niasse, 2004; UICN, 2004). Cette variation des débits est concomitante à celle de la pluviométrie. Par ailleurs, la forte croissance démographique, l'urbanisation accélérée et l'amélioration des standards de vie augmentent les besoins en eau et intensifient la pression sur une ressource en eau souvent peu disponible et relativement limitée. L'Afrique de l'Ouest est relativement peu dotée en grandes infrastructures hydrauliques capables de satisfaire les demandes. Ainsi, la question de l'allocation optimale de l'eau entre différents usages se pose aujourd'hui avec plus d'acuité (Barbier et al., 2006, 2009).

Dans la zone ouest africaine, le secteur primaire (agriculture et élevage) qui contribue pour plus de 40% au produit intérieur brut (PIB) et employant plus de la moitié de la population active, souffre de ces aléas climatiques (Silva, 2003; CEA-AO, 2009; Evans et al., 2012; Sarr et al., 2012). Il est donc important d'accroître le potentiel d'irrigation pour limiter les effets du changement climatique, ce qui nécessite de disposer de l'eau en quantité et en qualité suffisantes pour sécuriser la production agricole. L'une des réponses de ces dernières décennies à cette forte incertitude climatique est la maîtrise des ressources en eau de surface. Ainsi, de nombreux gouvernements et institutions ont entrepris de vastes plans d'aménagement visant la disponibilité plus régulière des ressources en eau douce à travers la construction de barrages sur de nombreux fleuves et rivières (FAO, 2003; McCartney &

Smakhtin, 2010; Venot & Krishnan, 2011). Ces barrages, à majorité les petits barrages ou petits réservoirs sont des innovations techniques nées d'un volontarisme politique (Birner et al., 2005). Les petits réservoirs représentent désormais une composante incontournable des paysages ruraux des pays soudano-sahéliens d'Afrique de l'Ouest et constituent un élément indéniable dans la gestion de la ressource en eau dans la moitié nord du bassin de la Volta (Sanou et al., 2011; Venot & Cecchi, 2011; de Fraiture et al., 2014). Ces réservoirs permettent d'atténuer d'une part les effets négatifs des sécheresses par une régulation temporelle de l'eau disponible, et d'autre part d'agir dans la protection contre les inondations. Une meilleure gestion des ressources en eau mérite par conséquent la plus haute attention, en particulier à travers une amélioration de leur fonctionnement (Mathlouthi & Lebdi, 2008). L'un des avantages additionnels de ces édifices hydrauliques est leur contribution à la recharge des nappes superficielles (Koussoubé, 1996).

En Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso est probablement le pays qui abrite la plus forte densité de petits barrages dont les plus anciens datent des années 1920 (Cecchi, 2006; Andreini et al., 2009; MAH, 2012). La présence des petits barrages a bouleversé les conditions du développement rural (Fromageot et al., 2006; Savy et al., 2006). Ces ouvrages hydrauliques contribuent significativement à :

- impulser l'économie des régions agricoles fragilisées ;
- améliorer les conditions de vie des paysans et leur niveau de revenus;
- contribuer à la sécurité alimentaire à travers les multiples usages de l'eau ;
- améliorer l'état sanitaire des populations locales;
- sédentariser les populations riveraines.

1.2 Problématique des petits barrages

Les petits barrages sont une réalité des zones rurales de nombreuses régions du monde. Du fait de leur nombre et de leur impact sur l'environnement, les petits barrages ont façonné considérablement le paysage hydrique de nombreux pays en Afrique subsaharienne (Leemhuis et al., 2009). Malgré les difficultés d'inventaire, leur nombre était estimé à 1700 au Burkina Faso, 800 au Mali, 600 en Côte d'Ivoire et 500 au Ghana (Venot & Cecchi, 2011). Au Burkina Faso, aucune réglementation actuelle ne guide la construction et l'exploitation des barrages. Le constat fait est le manque d'entretien et le besoin de réhabilitation de ces ouvrages. Ainsi, bon nombre de petits barrages se trouvent dans un état de dégradation mineure (érosion progressive des talus et de la crête de la digue, végétation sur la digue,

vieillesse du béton, etc.) ou avancée (rupture du déversoir ou de la digue, fissures des bajoyers, fuites d'eau sous la digue, etc.).

La plupart de ces aménagements hydrauliques, généralement situés à l'exutoire des petits bassins versants en tête de grands réseaux hydrographiques ne disposent pas d'information en quantité et/ou en qualité suffisante pour évaluer et comprendre leur fonctionnement hydrologique (Adwubi et al., 2009; Liebe et al., 2009; Rakhmatullaev, 2010). Les bassins versants drainant l'eau dans ces réservoirs sont non jaugés ou faiblement jaugés. Par conséquent, l'hydrologie des bassins versants en amont des petits barrages est très mal connue. Cette méconnaissance des processus physiques de transformation pluie-débit et la nature de l'information incomplète et souvent entachée d'erreurs des petits bassins constituent un handicap majeur à une meilleure gestion des volumes d'eau disponibles de ces réservoirs. L'absence d'information sur les apports en termes de ruissellement de surface et le manque de connaissance sur la dynamique de remplissage et de vidange des petits réservoirs entravent aussi les prises de décision pour leur planification et leur développement durable (Liebe et al., 2005; Peel & Blöschl, 2011; Salami & Nnadi, 2012). Une caractérisation du fonctionnement hydrologique des bassins versants des petits réservoirs permettra d'évaluer leurs réponses par rapport aux tendances climatiques futures prédites pour la région. Il existe très peu d'études abordant ces aspects dans les pays en développement.

Les petits barrages destinés initialement à l'alimentation en eau des populations et des cheptels ne sont toutefois plus limités à ces usages (Sally, 1997). De nos jours, ces infrastructures hydrauliques sont exploitées à diverses fins, y compris l'irrigation de petite à moyenne échelle, l'aquaculture dans une moindre mesure et les activités artisanales (Faulkner et al., 2008; Boelee et al., 2009; Cecchi et al., 2009a; Tran et al., 2011). Ainsi, le développement de certaines activités non formelles engendre parfois des conflits d'usages entre différents usagers autour de ces ouvrages. Ces barrages sont peu aménagés. On peut relever l'absence en général d'aménagements pastoraux (pistes ou couloirs d'accès et abreuvoirs) autour de ces retenues d'eau et des périmètres de protection non délimités.

Bien qu'il existe d'importants efforts de mobilisation des ressources en eau, les problèmes relatifs à l'eau persistent dans certains pays de la sous-région ouest africaine. Ces problèmes résident non seulement dans la disponibilité des ressources en eau liée à la péjoration climatique, mais aussi dans leur gestion et leur suivi attentif. Les petits barrages reçoivent moins d'attention, la gestion et le suivi étant plus consacrés aux grands barrages (Mustapha, 2009). Les modes actuels de gestion des petits barrages à l'échelle locale sont peu efficaces et ne permettent pas de résoudre des défis techniques (évaporation) et de concilier les multiples

objectifs de ces ouvrages. L'insuffisance de cadre de concertation et de réglementation, une faible capacité managériale et l'absence de coordination dans les projets d'aménagement et des acteurs autour de ces petits barrages ne favorisent pas la mise en place des approches participatives de gestion pouvant conduire à leur développement durable. Cependant, au Burkina Faso, avec la promotion de la gestion intégrée des ressources en eau depuis les années 1998, des efforts sont faits pour mettre en place des organes de gestion tels que les agences de l'eau et les comités locaux de l'eau dont les limites de gestion sont respectivement à l'échelle de bassins et de sous-bassins hydrographiques. A l'échelle des réservoirs, la gestion est souvent confiée aux associations d'usagers de l'eau qui ne disposent pas d'outils de gestion et bien souvent aussi des capacités scientifiques et techniques nécessaires pour accomplir leur mission (Sally et al., 2011).

Il est donc indispensable de développer des outils ou des instruments en s'appuyant sur le peu de données disponibles afin d'assurer une gestion et une valorisation optimales et durables de ces retenues d'eau.

L'exemple de l'hydro-système de Boura, est à l'image de la plupart des petits aménagements au Burkina Faso. Il est confronté à un problème de performances (Faulkner et al., 2008; Mdemu et al., 2009; de Fraiture et al., 2014) en termes de rentabilité (potentiels irrigables des petits réservoirs sous-estimés, bénéfices générés pas maîtrisés, productivité de l'eau relativement faible, coûts de construction relativement élevés), de connaissances (manque d'information sur la dynamique de remplissage et de vidange des réservoirs, manque d'information sur les usages de l'eau, absence de suivi hydrologique), de durabilité (fortes dégradations des infrastructures, absence de cadre de gestion ou faibles capacités managériales de la part des communautés locales, absence des systèmes et outils de gestion et de planification). Face à cette situation, depuis le début de la décennie 2000, on note un retour aux grands projets hydrauliques (par exemples le barrage de Samandéni au Burkina Faso, barrage de Bui au Ghana, barrage de Fomi en Guinée, barrage de Kandadji au Niger, etc.).

C'est pour répondre à certaines de ces préoccupations que cette thèse intitulée « *Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne du Burkina Faso* » a été initiée. Elle s'intègre dans le cadre du « *Challenge Program on Water and Food* » du bassin de la Volta. Cette thèse vise à accroître les connaissances sur les ressources en eau et à contribuer à la gestion des petits ouvrages hydrauliques. Pour ce faire, nous chercherons à apporter les réponses aux principales questions qui motivent cette étude à savoir :

- quelles informations pertinentes pour la reconstitution de la ressource en eau des petits réservoirs de bassins versants non jaugés ?

- comment établir les bilans hydrologiques de ces petits réservoirs en minimisant les incertitudes sur les termes du bilan et en adoptant l'échelle temporelle adéquate ?
- comment optimiser les usages et mieux valoriser la ressource en eau pour le développement des activités associées sous diverses contraintes (environnementales, climatiques, socio-économiques, etc.) ?
- quels seraient les impacts potentiels des changements et variabilités climatiques futurs sur les petits réservoirs ?

1.3 Présentation du “Challenge Program on Water and Food”

Le “Challenge Program on Water and Food” (CPWF ou Programme Défis pour l'Eau et l'Agriculture en français) est une initiative multi-institutionnelle de recherches lancée en 2002 par le “Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR)”. Son objectif principal est l'augmentation de la résilience des systèmes sociaux et écologiques à travers une meilleure gestion de l'eau pour la production alimentaire (<http://waterandfood.org>). Cette initiative s'est déroulée en deux phases :

- la 1^{ère} phase (2004-2008) conçue pour explorer une large gamme d'approches et de méthodes pour définir et résoudre les problèmes liés à l'eau et à la sécurité alimentaire ;
- la 2^e phase (2010-2013) structurée autour des défis de développement des bassins, a exploré les aspects institutionnels et techniques du développement et de l'entretien des petits barrages. Les activités de cette phase ont été menées sur six bassins fluviaux à travers le Monde dont trois en Afrique (bassins versants du Limpopo, du Nil et de la Volta).

Au niveau du bassin de la Volta, le programme “Volta Basin Development Challenges (VBDC)” était organisé en cinq projets parallèles et interdépendants chacun traitant d'un aspect particulier de la gestion de l'eau du bassin. Cette thèse s'inscrit au sein du projet Volta 3 (V3) intitulé « *Integrated Management of Small Reservoirs for Multiples Uses in the Volta Basin* » qui se focalise sur les options de gestion intégrée des petits barrages au niveau local, dans un contexte d'usages multiples. Il s'agit, via notamment la mise en œuvre de démarches participatives, de perpétuer les infrastructures, de protéger et le cas échéant améliorer la qualité de l'eau à usages multiples, de renforcer les potentiels de productivité de l'eau, et de rechercher l'équité.

1.4 Objectifs de la thèse

Le barrage-réservoir de Boura, situé au Sud du Burkina Faso a été choisi comme site pilote représentatif d'un grand nombre de petits réservoirs du bassin de la Volta soumis aux mêmes contraintes. L'objectif général poursuivi dans cette thèse est de contribuer à une meilleure caractérisation du fonctionnement hydrologique des petits réservoirs et à l'élaboration d'une plate-forme de gestion hydraulique des petits barrages à l'échelle du bassin de la Volta.

Plus spécifiquement, cette étude vise à :

- établir le bilan hydrologique du réservoir de Boura à partir d'une échelle temporelle adéquate : quantifier/estimer les différentes composantes du bilan en prenant en compte les incertitudes sur les variables mesurées;
- caractériser l'hydrologie du bassin versant non jaugé en amont du barrage de Boura : modéliser les transformations pluie-débit de ce bassin;
- élaborer un outil d'aide à la gestion optimisée du réservoir de Boura qui puisse être exploitable et exportable dans des environnements similaires;
- évaluer les impacts du changement et de la variabilité climatiques futurs sur les indices de performance du réservoir de Boura.

1.5 Description sommaire des méthodes de l'étude

L'ensemble des méthodes mises en œuvre pour cette étude peut être décliné en trois points :

- A partir des données issues du suivi hydrologique du réservoir de Boura, d'enquêtes de terrain durant les années 2012, 2013 et 2014 et de données sur les activités socio-économiques à Boura ainsi que les caractéristiques techniques du barrage, un état des lieux de la situation actuelle de l'exploitation du barrage de Boura est réalisée à travers les estimations des multiples composantes du bilan hydrologique ;
- Ensuite, les résultats obtenus sont utilisés comme observations pour, d'une part, mettre en œuvre le modèle hydrologique global GR4J sur le bassin versant et le modèle d'allocation de l'eau WEAP, et, d'autre part, tester les performances d'un outil de gestion optimisée des barrages sous contraintes;
- Enfin, la mise en place d'une chaîne de simulation en climat futur permet tout d'abord, d'estimer l'évolution de la ressource en eau du bassin versant de Boura et des demandes en eau, ensuite, de simuler le comportement de l'hydro-système pour leur gestion et pour finir, d'évaluer les éventuelles modifications des indices de performance dans un contexte de changement climatique.

1.6 Structuration de la thèse

Cette thèse est structurée autour de 8 chapitres qui peuvent être résumés comme suit :

Le premier chapitre présente le contexte scientifique, le cadre de recherche, les objectifs poursuivis et la description sommaire des méthodes mises en œuvre.

Le deuxième chapitre porte sur un état de l'art des connaissances sur les barrages. Il s'agit pour nous de rappeler l'importance des barrages dans le développement socio-économique des régions du monde et en particulier les régions arides et semi-arides ; également de présenter les aspects négatifs liés à leur implantation ; enfin, de faire le point sur l'évolution des méthodes de gestion des barrages.

Le troisième chapitre est consacré à la description du contexte physique et socio-économique de la zone d'étude.

Le quatrième chapitre présente le bilan hydrologique des barrages. Il s'agit de rappeler l'importance des études sur le bilan hydrologique de façon générale, puis à l'échelle spécifique de Boura. Les données utilisées (pluie, évaporation, niveau du plan d'eau) sont également présentées. Les composantes du bilan sur la période de suivi hydrologique (avril 2012 à octobre 2014) sont estimées.

Le cinquième chapitre est dédié à la calibration d'un modèle hydrologique global (modèle GR4J) des apports au réservoir de Boura et à la mise en œuvre d'un modèle d'allocation de l'eau (modèle WEAP). Des brèves descriptions de ces modèles sont présentées. Nous avons aussi établi les relations caractéristiques entre les pertes au niveau de la retenue (évaporation et infiltration) et les volumes stockés du réservoir.

Le sixième chapitre est destiné au développement d'un outil d'optimisation de la gestion des réservoirs et à son implémentation au cas spécifique du réservoir de Boura. Il commence par la formulation mathématique du problème de gestion de réservoir comportant les objectifs et les contraintes. Le prototype du système à optimiser est présenté ainsi que la structuration du programme d'optimisation sous Visual Basic. Les indicateurs de mesures de la performance du système modélisé sont également présentés. Les résultats de ce modèle de gestion optimisée sont discutés.

Le septième chapitre est consacré à l'évaluation des impacts de changement climatique sur la performance du système modélisé. Il s'est agi : (i) d'identifier et de corriger les biais des données de pluie et d'ETP à l'aide des procédures de correction des biais élaborées pour ramener les simulations climatiques dans l'amplitude des observations à partir de l'échelle

journalière, (ii) d'analyser les résultats du forçage du modèle GR4J et du modèle des demandes en eau avec les données climatiques corrigées sur différents horizons futurs, (iii) d'implémenter les scénarios de développement sous WEAP et d'évaluer les modifications des indices de performance du système modélisé.

La synthèse des résultats obtenus au cours cette étude avec une ouverture sur les futurs travaux est présentée dans le huitième chapitre.

CHAPITRE 2 : GÉNÉRALITÉS SUR LES BARRAGES-RÉSERVOIRS ET LEUR CADRE DE GESTION



Ce chapitre présente un état de connaissance sur les ouvrages de mobilisation des ressources en eau, en particulier des eaux de surface.

2.1 Quelques définitions

2.1.1 Barrage

Un *barrage* est un ouvrage d'art muni de vannes ou d'autres dispositifs de contrôle, construit en travers d'une vallée ou d'un cours d'eau pour régulariser l'écoulement, pour commander le niveau de l'eau en amont ou pour dériver l'eau vers un autre cours d'eau (UNESCO-WMO, 2012). Selon les matériaux de construction, on distingue deux principaux types de barrages : les barrages en maçonnerie ou en béton (barrage poids, barrage-voûte) et les barrages en remblai (barrage en enrochement, barrage en terre).

2.1.2 Réservoir ou retenue

Un *réservoir* ou une *retenue* désigne l'étendue d'eau formée par accumulation en amont d'un barrage ou dans des dépressions. Il existe deux types de réservoirs : les réservoirs naturels (exemples les lacs et les mares) et les réservoirs artificiels (exemples les barrages et les boulis).

Les réservoirs naturels sont d'origines très diverses : tectonique, volcanique, karstique, etc. Les réservoirs artificiels sont des masses d'eau créées à la suite d'actions humaines sur le milieu naturel. Ces réservoirs peuvent se constituer à partir de la construction d'une digue perpendiculairement ou latéralement à un cours d'eau ou à partir de l'excavation des sols (Votruba & Broza, 1989; Kay, 1999). Dans la configuration latérale, les réservoirs sont alimentés en eau soit par gravité, soit par pompage à partir d'une rivière. Il s'agit surtout des étangs. Au Burkina Faso, de très nombreux réservoirs ont été constitués à la faveur des travaux de rehaussement de la chaussée des routes.

Les lacs et les mares se distinguent surtout par leur étendue et leur profondeur. Un bouli est un réservoir d'une profondeur de 2 m à 4 m creusé dans le sol destiné à recueillir les eaux de ruissellement en saison de pluies.

La *Figure 2 - 1* illustre les systèmes de barrage-réservoir.



(a) Ziga au Burkina Faso

(b) Boura au Burkina Faso

Figure 2 - 1 : Illustration des barrages-réservoirs.

Dans ce chapitre, les termes « réservoirs » ou « plans d'eau » sont utilisés pour désigner toutes les installations ou ouvrages permettant de stocker de l'eau (réserve, stockage d'eau, étang, retenues de substitution).

2.2 Fonctions et caractéristiques géométriques des barrages-réservoirs

2.2.1 Fonctions des barrages-réservoirs

Les barrages sont conçus dans un objectif bien précis, mais certains ouvrages peuvent combiner plusieurs fonctions. Les tendances récentes favorisent les ouvrages à buts multiples (Jorgensen et al., 2005; Payan, 2007). Selon les objectifs de base, on peut distinguer :

- Les réservoirs de conservation d'eau

Ce sont des réservoirs créés en vue de garantir des sources d'eau fiables pour les différents besoins humains, agricoles, pastoraux, industriels, énergétiques, etc. Ces réservoirs servent également à réalimenter les nappes souterraines pour les besoins en eau potables des populations ;

- Les réservoirs d'écrêtement ou de contrôle des crues ou de régulation

Ces réservoirs servent à réduire les débits des crues par l'effet de laminage et limiter les dégâts causés par celles-ci.

- Les réservoirs à vocation environnementale

Ces réservoirs fournissent un cadre pour certains loisirs (activités récréatives). Ils permettent le développement de la production piscicole et servent d'habitats pour des espèces aquatiques (faune, flore). Ils permettent de soutenir les étiages des cours d'eau temporaires.

- Les réservoirs servant de pièges à sédiments et alluvions

Ces réservoirs sont généralement utilisés pour protéger les grands ouvrages du phénomène de sédimentation, d'envasement et d'ensablement afin de faciliter la navigation et limiter l'invasion des plans d'eau par certaines plantes aquatiques. Ils sont situés en amont des grands ouvrages.

2.2.2 Caractéristiques géométriques des barrages-réservoirs

De façon générale, les paramètres géométriques tels que la hauteur et la capacité des barrages-réservoirs sont des critères permettant de classer les ouvrages de mobilisation des eaux de surface. D'après la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), lorsqu'un barrage a une hauteur d'au moins 15 m à partir de la fondation, il est classé parmi les grands barrages (WCD, 2000). Si un barrage a une hauteur comprise entre 5 et 15 m avec un réservoir de capacité supérieure à 3 millions de m³, il est aussi classé comme grand barrage. Il n'existe pas de normes internationales pour les petits et moyens barrages. Sur la base de cette définition, la commission mondiale des barrages estimait à 45 000 le nombre de grands barrages à travers le monde à la fin du XX^{ème} siècle avec 1300 barrages en Afrique (FAO-AQUASTAT, 2007). L'Afrique de l'Ouest est peu dotée en grandes infrastructures hydrauliques (Barbier et al., 2009). On peut citer les grands ouvrages du bassin de la Volta en particulier Bagré, Kompienga, Akosombo, etc.

A l'échelle des pays, ces seuils ne sont pas toujours considérés (Rukuni, 2006). En Afrique du Sud par exemple, les barrages sont classés en fonction de leur hauteur : petit (entre 5 et 12 m), moyen (entre 12 et 30 m) et grand (supérieure ou égale à 30 m) barrages. Au Burkina Faso, il n'existe pas de classification des ouvrages. Cependant, il ressort des/de l'inventaire (s) des ouvrages de mobilisation des eaux de surface que plus de 95% des barrages ont une hauteur inférieure à 10 m. Près de 70% de ces barrages ont une capacité inférieure à 1 million de m³ : il s'agit de « *petits barrages* » ou encore « *petits réservoirs* » (MEE, 2000). Ces réservoirs se trouvent le plus souvent en tête des grands réseaux hydrographiques et sont généralement non pérennes (Liebe, 2002; Cecchi, 2007; Liebe et al., 2009). Le barrage de Boura d'une profondeur maximale de 5 m se situe parfaitement dans cette catégorie.

2.3 Etat des lieux des ouvrages de mobilisation des ressources en eau au Burkina Faso

La politique de l'eau demeure l'une des priorités du gouvernement burkinabè. Toutefois, l'irrégularité et la mauvaise répartition des pluies dans le temps et dans l'espace, les conditions géographiques et géologiques du territoire font que les ressources en eau superficielle et souterraine sont peu abondantes. Pour pallier à cette situation, un accent a été mis sur les ouvrages de mobilisation de l'eau dont les plus anciens datent des années 1920

avec les petits barrages en terre homogène construits bien souvent sous l'impulsion des missionnaires. La construction des petits réservoirs a été également impulsée grâce à la stratégie de valorisation des terres à travers la politique nationale de promotion de la petite irrigation. Mais, ce sont les grandes sécheresses des années 70 puis 80 qui ont contribué à faire du Burkina Faso l'un des pays de la sous-région les mieux dotés en infrastructures hydrauliques. Ainsi, le paysage burkinabè est marqué par de nombreuses infrastructures hydrauliques dont le nombre ne cesse d'augmenter (*Figure 2 - 2*).

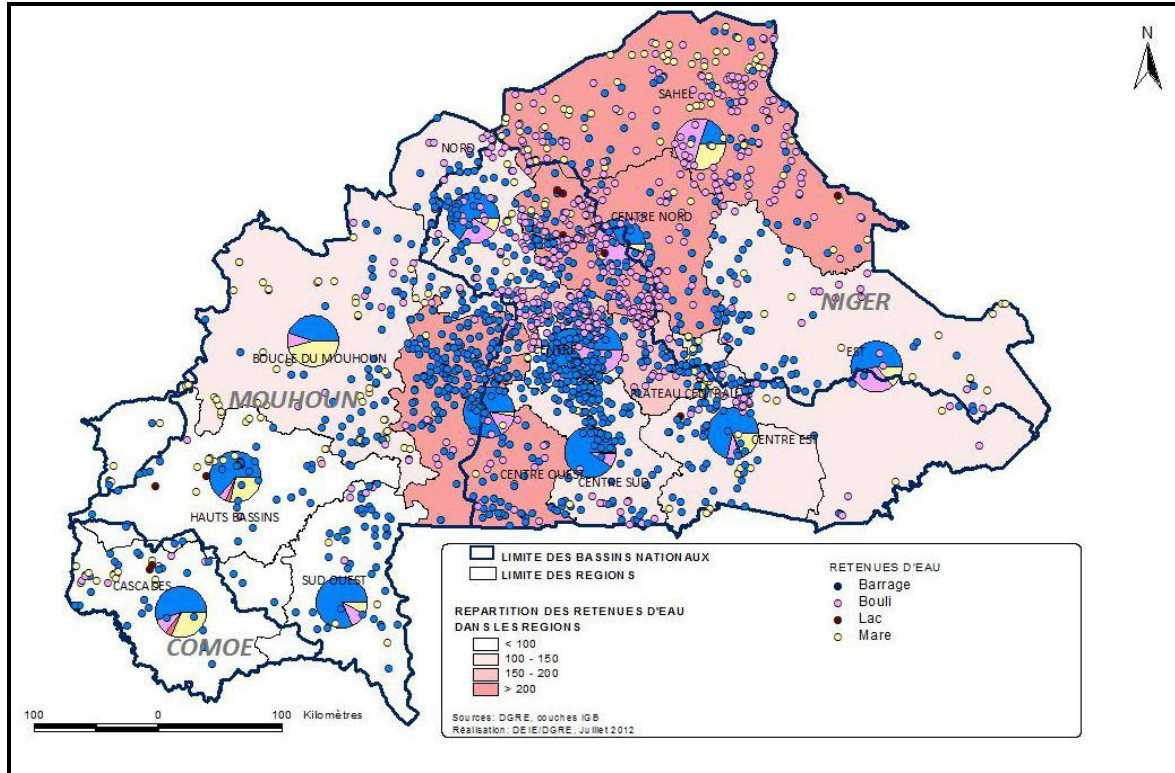


Figure 2 - 2 : Carte des retenues d'eau du Burkina Faso en 2011 (d'après MAH, 2012).

2.3.1 Typologie des ouvrages de mobilisation des ressources en eau et des aménagements hydro-agricoles

Afin d'assurer une meilleure planification des ressources en eau, plusieurs initiatives ont été entreprises pour faire l'inventaire des réalisations hydrauliques sur l'ensemble du territoire burkinabé (projet UNESCO¹ en 1985 ; ONBAH², 1987 ; Projet Bilan d'Eau en 1988 ; programmes RESO et BAD³ en 1993). De nombreux ouvrages de mobilisation de la ressource en eau tant de surface que souterraine ont été réalisés afin de satisfaire les différentes sollicitations (IWACO, 1989).

¹ Projet Petits Barrages au Burkina Faso : Bilan et analyse critique

² Inventaire et reconnaissance générale de l'état des barrages et retenues d'eau au Burkina Faso

³ Programme de Valorisation des Ressources en Eau dans le Sud-Ouest du Burkina Faso

Les ouvrages de mobilisation des eaux de surface sont composés par les petits barrages et les grands barrages, les aménagements de mares ou boulis, les aménagements des chutes d'eau et les seuils sur les rivières. Quant aux eaux souterraines, elles sont essentiellement mobilisées à l'aide des ouvrages de captage hydrogéologique. Il s'agit des puits traditionnels, des puits modernes et des forages (MEE, 2000). Toutefois, on considère comme points d'eau modernes l'ensemble des forages positifs et des puits modernes, quels que soient leurs états (permanents ou temporaires). Il existe d'autres types particuliers d'ouvrages tels que les grands puits et les barrages souterrains (barrage de Naré dans la province du Namentanga).

Au Burkina Faso, les aménagements hydro-agricoles sont classés selon la typologie du Comité Inter-Etat de Lutte Contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) (MAHRH, 2003). Ainsi, on distingue :

- Les aménagements de Type 1 : Il s'agit des périmètres de grande taille (Sourou, Bagré, vallée du Kou, etc.) avec une maîtrise totale de l'eau et dotés d'une gestion propre. La production est essentiellement rizicole mais on cultive aussi le blé, le maïs, le soja et les fruitiers. La taille des parcelles varie entre 0,5 et 1 ha ;
- Les aménagements de Type 2 : Ils concernent les périmètres maraîchers ou fruitiers. L'irrigation se fait par pompage et le réseau est de type californien ou gravitaire. Les parcelles sont de petite taille (inférieure à 0,25 ha) ;
- Les aménagements de Type 3: Il s'agit des périmètres de taille modeste (20 à 100 ha) situés essentiellement en aval des barrages. L'irrigation est gravitaire. Les exploitations sont familiales (0,1 à 0,25 ha). Ce type est de loin le plus répandu sur le plateau central et le sud-ouest du Burkina Faso;
- Les aménagements de Type 4: Ce sont des périmètres situés dans les bas-fonds. La maîtrise de l'eau est partielle (submersion contrôlée). Les parcelles sont de petite taille (0,1 à 0,5 ha) ;
- Les aménagements de Type 5: Il s'agit de la petite irrigation (informelle et privée). Ces périmètres sont généralement situés près des retenues d'eau ou dans les zones où la nappe phréatique est peu profonde. L'exhaure est manuelle ou réalisée parfois à l'aide de petites pompes, à partir des puits ou puisards.

2.3.2 Situation des ouvrages de mobilisation au Burkina Faso

La connaissance de la ressource en eau du point de vue quantitatif et qualitatif, de même que sa dynamique dans le temps s'avère indispensable pour assurer une bonne gestion de l'eau.

Les sources de données sur les ressources en eau de surface et souterraine sont très diverses au Burkina Faso (MEE, 2001).

Fort de cette considération et dans le cadre de la mise en place du Système National d'Information sur l'Eau (SNIEau), le Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique (MAH), à travers sa Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau (DEIE), a fait une mise à jour des données sur les ouvrages de mobilisation des eaux de surface (MAH, 2012). Cette étude a permis de recenser 1806 retenues d'eau de surface, à comparer aux nombres de 1053 et 1700 réservoirs annoncés respectivement par Leemhuis et al. (2009) et Boelee et al. (2009). Près de la moitié de ces barrages ont été construits entre les années 1974 et 1987 (**Figure 2 - 3**). Cette période coïncide avec celle de fortes sécheresses des décennies 70 et 80 en Afrique de l'Ouest (Cecchi et al., 2009b), la forte croissance démographique et la promotion de la petite irrigation.

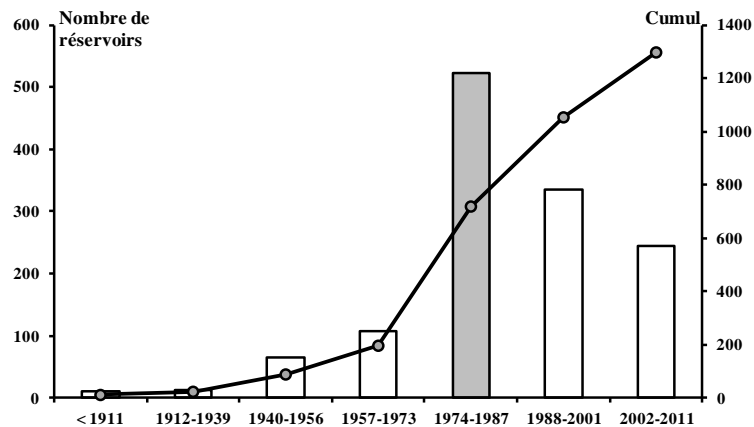


Figure 2 - 3 : Evolution du nombre de réservoirs au Burkina Faso. Seuls sont pris en compte les ouvrages recensés dans la base de la DGRE dont l'année de construction est connue ($N = 1297$) (d'après Cecchi et al, 2009 ; MAH, 2012).

La répartition des ouvrages par type à l'échelle du Burkina Faso est présentée à la **Figure 2 - 4**. Le Burkina Faso dispose de très peu de lacs naturels. La **Figure 2 - 2** montre la répartition spatiale de ces ouvrages dans les différentes régions du Burkina Faso. Le potentiel stockable de ces retenues d'eau est évalué à environ 5 milliards de m^3 dont 0,8 milliard de m^3 représente la capacité de stockage des petits barrages (MEE, 2000; FAO-AQUASTAT, 2007; Leemhuis et al., 2009). Cependant, certains barrages ne se remplissent pas. C'est le cas du barrage hydro-électrique de Komienga à l'est du Burkina Faso aménagé en 1984 avec une capacité d'environ 2 milliards de m^3 . Pour ce qui est de l'état des ouvrages, près de 40% des barrages sont fortement dégradés dont 22% se sont rompus au niveau de la digue ou par le déversoir. Par ailleurs, seulement 30% des retenues sont pérennes, bon nombre de retenues d'eau tarissent avant le début de la saison pluvieuse (MAH, 2012).

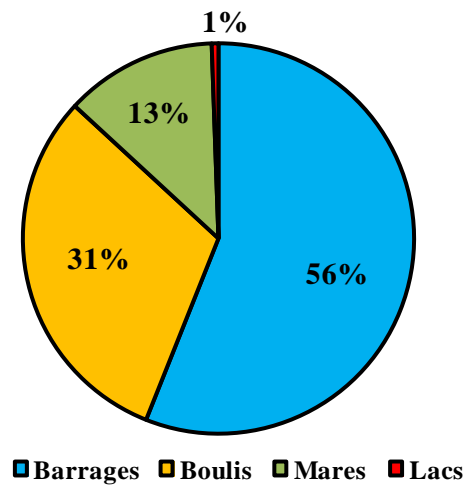


Figure 2 - 4 : Proportion des réservoirs par catégorie au Burkina Faso

Source : MAH, 2012

Au Burkina Faso, la réalisation de certains grands barrages (digues ayant plus de 10 m de hauteur avec une capacité avoisinant ou dépassant une centaine de millions de m³) a commencé à partir des années 1980. Ainsi, le **Tableau 2 - 1** présente les caractéristiques et les principales fonctions de quelques retenues importantes au Burkina Faso.

Tableau 2 - 1 : Situation de quelques grands barrages au Burkina Faso.

Bassin hydrographique	Nom du barrage	Année de construction	Hauteur (m)	Capacité (millions m ³)	Utilisations dominantes
Nakanbé	Kompienga	1984	50	2050	Energie, pêche
Nakanbé	Bagré	1992	41	1700	Irrigation, énergie, pêche
Mouhoun	Lery	1985	8	500	Irrigation
Nakanbé	Ziga	1999	19	208	AEP
Nakanbé	Toécé	1994	21	100	Irrigation

Le cumul des capacités des barrages de Kompienga et Bagré représente plus de 60% du potentiel de stockage des retenues du Burkina Faso.

2.4 Avantages et inconvénients des barrages

2.4.1 Aspects positifs associés aux barrages

L'eau des réservoirs est aujourd'hui utilisée par de nombreux secteurs d'activités (**Figure 2 - 5**). Les usages de l'eau se sont multipliés et diversifiés depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Ces usages sont subdivisés en deux groupes : les usages consommateurs et non consommateurs de l'eau (Shrestha et al., 1996).

2.4.1.1 Usages consommateurs d'eau

a) Usages agricoles

La moitié des grands barrages a été construite exclusivement ou principalement à des fins d'irrigation, et on estime que 30 à 40% de la superficie totale des terres irriguées à travers le monde dépendent des barrages. En Afrique et en Asie, la majorité des grands barrages sont prioritairement utilisés pour l'irrigation, bien qu'ils soient le plus souvent destinés à des fins multiples (WCD, 2000). L'irrigation est en effet le plus grand consommateur d'eau (Mdemu et al., 2009; FAO-AQUASTAT, 2013) et 40% de la production agricole mondiale est issue de l'agriculture irriguée.

En Afrique de l'Ouest, l'utilisation agricole des barrages ne s'est réellement développée qu'à partir des années 1970. Au Burkina Faso, les prélèvements du secteur de l'irrigation représentent 64% de la demande totale consommatrice d'eau (MEE, 2001). Globalement l'irrigation se pratique sur 63% des barrages (MAH, 2012). En 2011, les 54275 ha équipés pour l'irrigation ne représentaient que 1% de la superficie totale cultivée (FAO-AQUASTAT, 2013). Les cultures concernées sont aussi bien les cultures vivrières que les cultures industrielles (exemples : le riz au barrage de Bagré et la canne à sucre au barrage de Moussodougou). L'irrigation, bien qu'étant incontournable pour le développement de l'agriculture en saison sèche, demeure encore marginale du point de vue des surfaces aménagées. Le développement de l'irrigation, en particulier la petite irrigation est en croissance significative et participe à la sécurité alimentaire et à la réduction de la pauvreté, surtout en milieu rural.

b) Besoins pastoraux

L'usage pastoral est prédominant dans tous les types d'ouvrages de mobilisation des eaux de surface (plus de 90%). L'élevage assez diversifié avec un cheptel important joue un rôle considérable dans l'économie du Burkina Faso. C'est donc dire l'importance que revêt l'alimentation en eau du bétail surtout pendant la saison sèche, et dans les zones arides et semi-arides.

De nombreux ouvrages ont été créés spécifiquement pour satisfaire les demandes en eau du cheptel. L'abreuvement des animaux est fait soit directement dans les retenues de petites et moyennes tailles, soit dans les canaux primaires des périmètres aménagés. Le volume d'eau nécessaire au bétail est estimé à 72 millions de m³ par an et représente environ 14% du volume total d'eau consommée (MEE, 2001). La présence des plans d'eau favorise le développement des ressources fourragères où les pasteurs vont faire paître leur bétail.

c) Besoins humains et approvisionnement en eau potable

L'historique des petits barrages au Burkina Faso montre que la plupart des premiers programmes de construction de barrages ont été motivés par la satisfaction des besoins humains (Nombre, 1995). Toutefois, face aux problèmes notamment sanitaires (maladies hydriques) posés par la consommation directe de l'eau brute des barrages, il était généralement préconisé d'exploiter l'eau issue des puits à partir de la nappe phréatique alimentée par les retenues. Plus récemment, des dispositifs de filtration de l'eau ont aussi été installés sur certaines retenues (Loropéni et Navriké dans les provinces de la Bougouriba et du Poni) afin d'améliorer la qualité de l'eau consommée à partir de ces barrages. Aujourd'hui, les points d'eau modernes (puits et forages) constituent les principales sources d'approvisionnement en eau des populations rurales.

Comme partout, des usages domestiques divers sont fréquemment observés, depuis la baignade, en passant par la lessive, le nettoyage des véhicules ou encore le puisage d'eau pour la confection des briques en terre. Les réservoirs sont aussi utilisés pour l'alimentation en eau potable. La ville de Ouagadougou ne dépend presque exclusivement que des eaux de surface (barrage n°3 de Ouagadougou, Loumbila, Ziga). La demande en eau domestique est estimée à 104 millions de m³ par an, dont 40 millions pour la demande urbaine et semi-urbaine et 64 millions pour la demande rurale (MEE, 2001).

d) Industriels

La demande en eau industrielle est globalement faible, mais on peut avoir des demandes ponctuelles très importantes qui varient dans le temps selon les types de production. Au Burkina Faso, elle était évaluée à 6 millions de m³ par an (MEE, 2001).

2.4.1.2 Usages non consommateurs d'eau*a) Pêche et pisciculture*

Les plans d'eau sont le lieu de développement des activités piscicoles qui permettent de valoriser davantage ces ouvrages. Le potentiel d'exploitation reste encore important et est en cours de développement. La production de poissons est aussi une activité para-agricole importante dans les réservoirs en Afrique de l'Ouest. Pendant la sécheresse des années 70, la pêche est devenue une activité économique très importante et une source d'alimentation au Burkina Faso. Malgré qu'elle soit conceptuellement un usage non consommateur d'eau, les stocks d'eau nécessaires pour maintenir les activités piscicoles ont été estimés pour différentes cultures de poissons (Mdemu, 2008; Tran et al., 2011). En Afrique de l'Ouest, d'importants investissements (construction des débarcadères, développement des projets

piscicoles, etc.) ont été réalisés pour la promotion de la pêche autour des réservoirs. On peut citer le Projet d'Élevage de Poissons (PEP) de Bagré au Burkina Faso.

b) Activités touristiques et de loisirs

Le plan d'eau offre un cadre où peuvent se développer des activités récréatives et touristiques. Les activités récréatives sur les berges des plans d'eau ont vu le jour durant le siècle dernier, et se sont pérennisées dans certains pays. Ces activités n'intègrent pas seulement la baignade, la natation, la pêche et d'autres sports nautiques, mais aussi la navigation de plaisance, le camping etc. Au Burkina Faso, des compétitions de courses en pirogues sont parfois organisées sur le barrage n°3 de Ouagadougou à l'initiative de promoteurs privés. Un centre éco-touristique pourvu d'une plage artificielle est ouvert aux abords du barrage de Bagré. Des structures hôtelières sont présentes aussi autour du barrage de Kompienga.

c) Production d'énergie hydroélectrique

La production énergétique est un objectif majeur de développement des ressources en eau des systèmes barrages-réservoirs (Karamouz et al., 2003). L'hydroélectricité représente 16% de la production mondiale d'électricité (Iacona et al., 2012). Elle fournit 32% de l'énergie en Afrique, mais la consommation d'électricité du continent est la plus faible au monde. Le potentiel hydroélectrique de l'Afrique est sous-exploité, car seulement 3% de ses ressources renouvelables en eau sont exploités pour l'hydroélectricité. Les opportunités existent pour développer cette ressource inexploitée, mais elles devraient être entreprises de manière à éviter les coûts environnementaux et sociaux caractéristiques des grands barrages hydrauliques (PNUE, 2010).

En Afrique de l'Ouest, l'hydroélectricité contribue à 40% de la production totale de l'électricité, le reste étant produit par les centrales thermiques à partir de pétrole ou de gaz naturel (FMI, 2009). Le barrage d'Akosombo au Ghana construit sur le cours d'eau Volta est destiné à la production hydroélectrique. Au Burkina Faso, plusieurs barrages sont utilisés exclusivement ou partiellement pour la production d'énergie. Il s'agit des barrages de Kompienga, Bagré, Tourni, Niofila et Samandeni (en construction). La quantité d'eau turbinée par les centrales de ces barrages est estimée à un peu plus de 2 milliards de m³ par an en moyenne (MEE, 2001). Bien que ce soit un usage non consommateur d'eau, le stockage des volumes d'eau nécessaires pour cette activité engendre une grande perte par évaporation et peut imposer de fortes contraintes pour les usagers de l'eau à l'amont afin de garantir le remplissage des barrages.

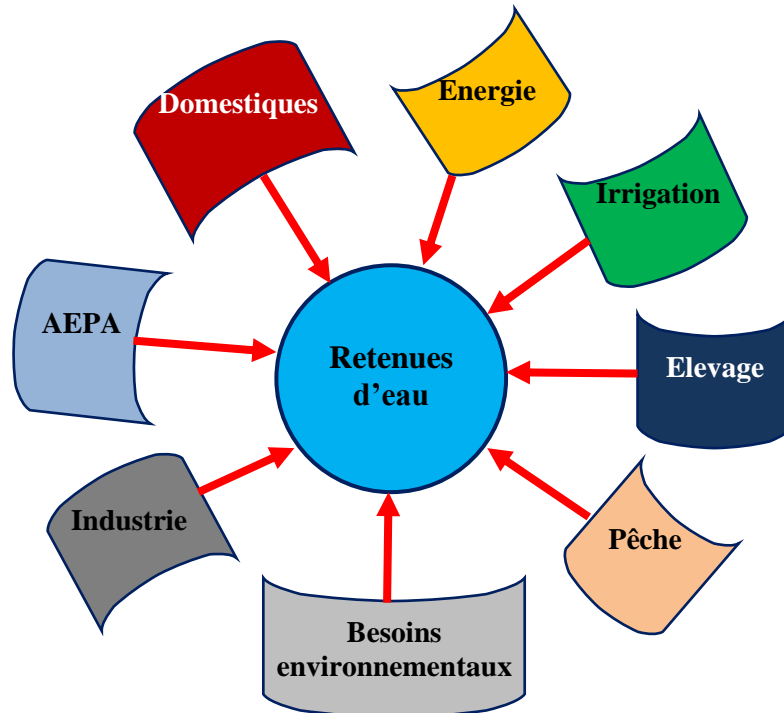


Figure 2 - 5 : Usages de l'eau des réservoirs.

2.4.2 Impacts négatifs associés aux barrages

L'implantation des barrages fait l'objet de nombreuses controverses internationales, les problèmes locaux sont aujourd'hui mondialisés. Les barrages offrent à la société des bénéfices considérables mais imposent également des impacts négatifs non négligeables, que ce soit dans le domaine environnemental, sanitaire, économique ou social (Fisher, 2001; Leroy Poff & Hart, 2002). Dans certains pays, l'opposition grandissante d'organisations écologiques et de communautés menacées d'être déplacées, entrave, voire empêche totalement la construction de nouveaux ouvrages (Payan, 2007).

2.4.2.1 Impacts environnementaux

Les barrages ont une multitude d'effets négatifs sur l'environnement (Collier et al., 1996; Nilsson and Berggren, 2000; WCD, 2000; Bunn and Arthington, 2002; Dittmann et al., 2009). La construction d'un barrage altère le tronçon du cours d'eau à l'amont changeant ainsi radicalement l'environnement immédiat du barrage (Choi et al., 2005).

Les eaux stagnantes dues à la présence d'un barrage entraînent une dégradation de la qualité de l'eau telle que la température, les sédiments en suspension, l'oxygène dissous et la concentration d'autres substances dissoutes au niveau des sorties du barrage peut varier très fortement de la concentration à l'entrée de la retenue. Le transport de sédiments, de

nutriments et la matière organique est interrompu par l'implantation de l'ouvrage avec des risques d'eutrophisation des plans d'eau (Stephenson & Petersen, 1991).

De même, les modifications des régimes d'écoulement des cours d'eau sur lesquels sont construits les barrages, ont un effet néfaste sur une grande variété des fonctions de l'écosystème riverain. Le développement de l'irrigation intensive autour des retenues d'eau provoque l'augmentation de la salinité des sols, ce qui paradoxalement, détériore la qualité des sols.

La barrière physique érigée avec la construction d'un barrage, bloque la migration des poissons et perturbe leur cycle de vie. La construction des nouveaux barrages au Burkina Faso intègre les échelles à poissons (cas du barrage de Saaba) pour permettre une connectivité entre l'amont et l'aval. Les types de poissons dans les réservoirs peuvent être différents de ceux observés dans les cours d'eau à cause des niveaux d'eau plus stables et de la qualité de l'eau. Dans la plupart des barrages au Burkina Faso, le débit écologique ou débit réservé n'est pas toujours pris en considération (le débit écologique est le volume minimum qui doit être libéré d'un réservoir de façon continue pour assurer la vie de l'écosystème en aval de l'ouvrage). Il y a aussi le non respect des périmètres ou limites de protection des ouvrages. En effet, l'occupation des berges à des fins agricoles ou d'autres activités (exemple orpaillage) concoure à la dégradation de la qualité des eaux par pollution chimique (pesticides et substances chimiques) et favorise l'eutrophisation des plans d'eau et par conséquent la prolifération des plantes aquatiques envahissantes. Ces plantes provoquent un assèchement rapide des plans d'eau limitant la pratique de certaines activités socio-économiques (exemple pêche, maraichage, etc.). Il en est de même de l'érosion des sols et du transport des sédiments par ruissellement des berges, qui contribuent à la sédimentation des petits réservoirs et par conséquent à la réduction de leur capacité de mobilisation (Schmengler, 2011).

2.4.2.2 Impacts hydrologiques

La présence d'un barrage sur un bassin versant aura un impact à plusieurs niveaux du cycle hydrologique : les régimes d'écoulement, les réserves d'eau, les échanges avec le sol ainsi que l'évaporation peuvent être influencés (**Figure 2 - 6**). Plusieurs études (Ligon et al., 1995; Desconnets et al., 1998; Peters & Prowse, 2001; Assani et al., 2002; Poff et al., 2007) se sont intéressées aux impacts d'un ou plusieurs barrages sur le comportement hydrologique d'un bassin versant. Globalement, ces études ont montré que les aménagements peuvent entraîner une irrégularité du régime hydrologique à travers une réduction de l'amplitude des débits extrêmes et une modification des périodes de hautes et de basses eaux. En outre, l'eau stockée peut s'évaporer à un rythme plus élevé que l'eau à écoulement libre.

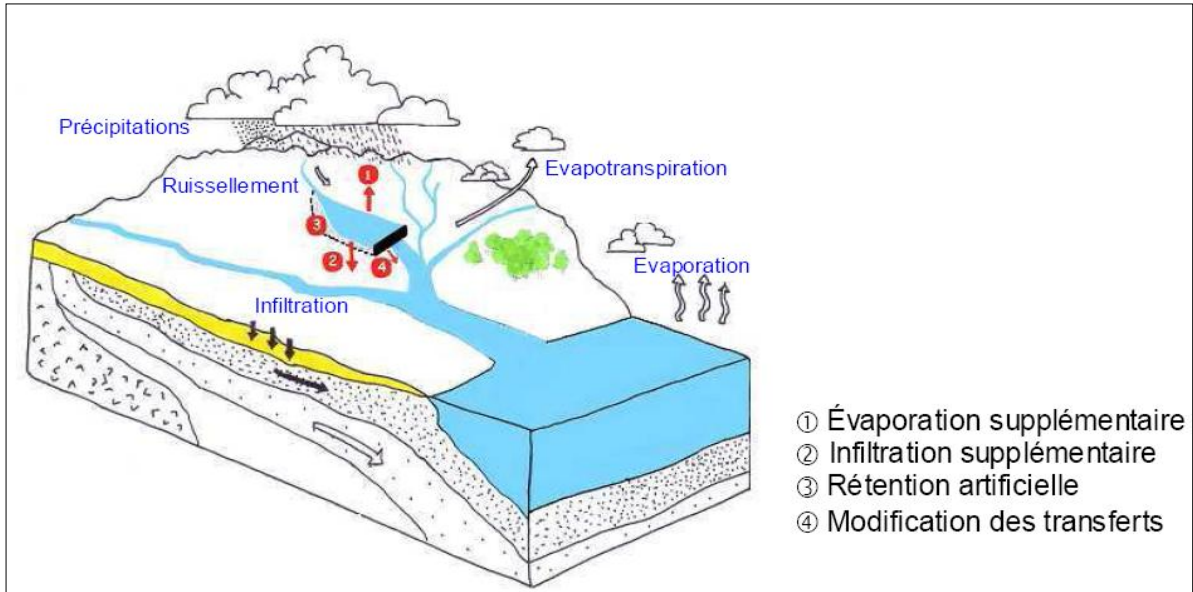


Figure 2 - 6 : Modifications du cycle hydrologique pouvant être engendrées par un barrage (d'après Moulin et al., 2005).

2.4.2.3 Impacts socio-économiques et sanitaires

Les barrages-réservoirs, notamment ceux qui sont grands, peuvent également avoir des impacts négatifs sur les sociétés humaines, nécessitant le déplacement de population et leur réinstallation ailleurs, ce qui conduit à des perturbations sociales. En effet, les réservoirs des barrages englobent de larges zones de territoires entraînant des grands mouvements forcés de populations locales. La construction de grands barrages a conduit au déplacement de quelques 40 à 80 millions de personnes à travers le monde (WCD, 2000). Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation du taux de chômage et contribue à l'accroissement de la paupérisation de la population. De plus, l'expansion de la surface d'eau entraîne une augmentation de l'humidité générale du milieu. Il y a donc une multiplication des risques sanitaires (développement des maladies d'origine hydriques), notamment un accroissement du taux de prévalence du paludisme dans les zones rurales. En effet, une augmentation de la prévalence globale de *Plasmodium* de 64,2% à 76,6% entre 2007 et 2010 a été observée dans certaines zones rurales du Burkina Faso disposant des plans d'eau (Gnémé et al., 2013). On peut aussi citer les bilharzioses (schistosomiasis).

Au Burkina Faso, on assiste parfois à des conflits d'usages et entre différents usagers autour des petits barrages notamment les conflits entre agriculteurs et éleveurs surtout dus aux faibles aménagements autour de ces ouvrages (absence de couloirs à bétails, absence des pâturages). On assiste également à une forte pression foncière engendrée par l'enneigement d'importantes superficies de terres mais aussi par l'augmentation rapide de la population due

à un afflux des populations allogènes. Il y a également des conflits entre éleveurs et pêcheurs occasionnés par la destruction du matériel de pêche par les animaux pendant leur abreuvement.

Sur le plan économique, les petits barrages ne sont pas exploités à leur optimum. Cette sous exploitation est due à une faible valorisation des aménagements en aval des barrages et à une insuffisance de cadre de concertation et d'outils de gestion de l'eau. Il se pose donc un problème de faibles performances en termes de rentabilité et de durabilité de ces aménagements malgré d'énormes investissements consentis (Venot & Cecchi, 2011; de Fraiture et al., 2014).

2.5 Méthodes de gestion des barrages

La gestion des barrages figure parmi les sujets fondamentaux du domaine de planification et de la gestion des ressources en eau. L'évolution des besoins de toutes natures et l'expression d'une nouvelle volonté de valorisation de la ressource en eau conduisent les gestionnaires d'ouvrages à porter un intérêt accru à l'efficacité de la gestion des aménagements (Fang, 1988; Parent, 1991). Le problème de gestion des barrages peut être analysé en utilisant diverses techniques quantitatives.

2.5.1 Méthodes classiques de gestion des barrages

Les méthodes classiques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes empiriques et les méthodes statistiques ou stochastiques. Ces méthodes reposent sur l'analyse des courbes des débits cumulés, des débits classés et des débits générés ou synthétiques (McMahon & Mein, 1978; Li, 1987; Fang, 1988). Nous présenterons par la suite deux méthodes caractéristiques : la méthode du « *fil tendu* » et celle de la courbe objectif.

2.5.1.1 Méthode du fil tendu

La méthode du fil tendu, proposée par H. Varlet en 1923, s'appuie sur des représentations graphiques pour la gestion de réservoirs. Elle repose sur l'analyse de la courbe de débits cumulés. La paternité de cette méthode revient à Rippl (1883) qui utilisait une technique analogue appelée « *Rippl Diagram method* » pour le dimensionnement d'un barrage-réservoir à partir des chroniques historiques.

La démarche de cette méthode décrite par Li (1987) et Fang (1988) peut se résumer en trois étapes à l'aide de la **Figure 2 - 7**:

- ♣ En régime naturel, sur la base des observations du débit en amont du réservoir, on construit la courbe des débits naturels cumulés (A) et par une translation verticale de cette courbe dans le sens des ordonnées négatives d'amplitude égale à la capacité

totale du réservoir (S_{max}), on obtiendra une autre courbe (A'). Les courbes (A) et (A') représentent respectivement le régime du réservoir plein et le régime du réservoir vide.

- ♣ On trace des courbes joignant le point N (état initial du réservoir) et le point P (état final du réservoir). La gestion du réservoir consiste à déterminer la courbe rationnelle des débits lâchés cumulés située entre les courbes (A) et (A'). Cette méthode est bâtie sur le principe de moindre action c'est-à-dire la recherche du chemin entre deux points qui correspondrait à une action minimale (énergie minimale). Ainsi, la courbe (NBCP) est celle que l'on recherche.
- ♣ On mesure la pente de la courbe (NBCP) qui est égale à la valeur de la lâchure optimale.

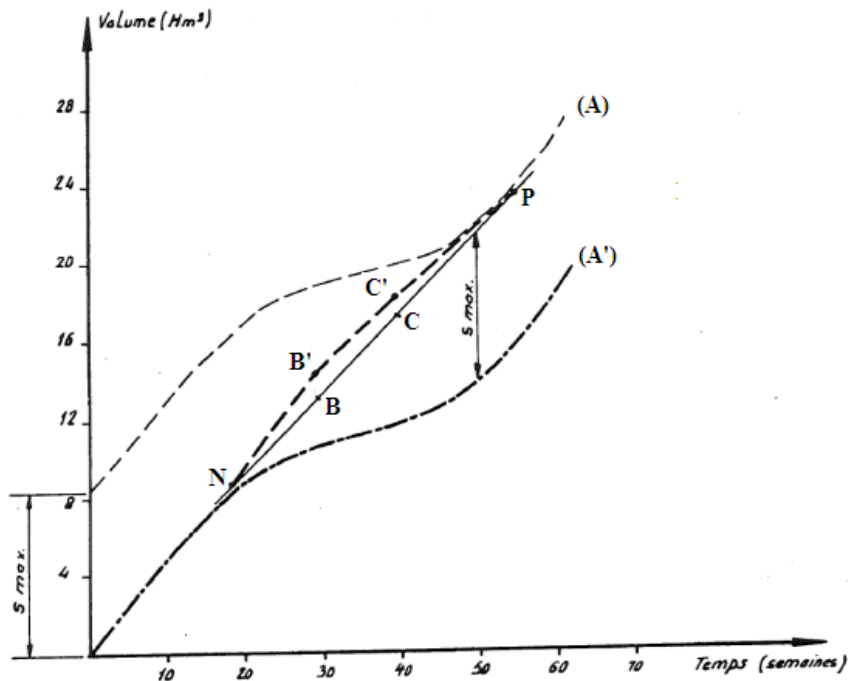


Figure 2 - 7 : Gestion des barrages par la méthode du « fil tendu » (d'après Fang, 1988).

La programmation de la méthode du fil tendu sur ordinateur a redonné de la vitalité à cette ancienne méthode. Elle devient une méthode informatique et peut être utilisée pour gérer les réservoirs avec plusieurs contraintes (Li, 1987). Le principal avantage de cette méthode est son temps d'exécution relativement court. La méthode du fil tendu est applicable pour la gestion de réservoirs en avenir certain et incertain.

2.5.1.2 Méthode de la courbe objectif de remplissage

La technique la plus utilisée pour la gestion effective de barrages-réservoirs est probablement celle de la courbe objectif (Fang, 1988). Elle permet de déterminer les signatures du stock nécessaire, à chaque date donnée, pour répondre aux besoins avec un taux de satisfaction fixé.

Le gestionnaire du barrage observe de façon continue les niveaux dans le réservoir et dans les rivières afin de prendre des décisions par rapport à la situation courante (Parent, 1991; Pabiot, 1999).

Un réservoir est généralement subdivisé en quatre zones (**Figure 2 - 8**). Du bas vers le haut on a :

- ♣ Une *zone inactive* sous le niveau de la prise d'eau accessible ou non par pompage, à utiliser en ultime recours et conservée également pour des raisons écologiques. Dans les conditions climatiques extrêmes, cette réserve d'eau subit la pression évaporatoire.
- ♣ Une *zone tampon* également considérée comme une zone de restriction : si l'on entre dans cette zone, c'est un signal d'alarme pour réduire les lâchers au minimum vital. Un coefficient dit « *coefficient tampon* » permet de réguler les lâchers.
- ♣ Une *zone de fonctionnement normal ou zone de conservation* où se situe l'état idéal du réservoir et qui permet une certaine marge due aux aléas hydrologiques.
- ♣ Une *zone d'écrêtement des crues* qui permet de faire face à des crues. Au dessus de cette zone, il y a débordement par la crête du barrage.

Les *zones de conservation* et *tampon* constituent la capacité active du réservoir tandis que la zone inactive représente sa capacité morte. Pour les petits réservoirs, il existe rarement de zone tampon. Dans ce cas, le sommet de la zone tampon est confondu au sommet de la zone inactive (Rukuni, 2006).

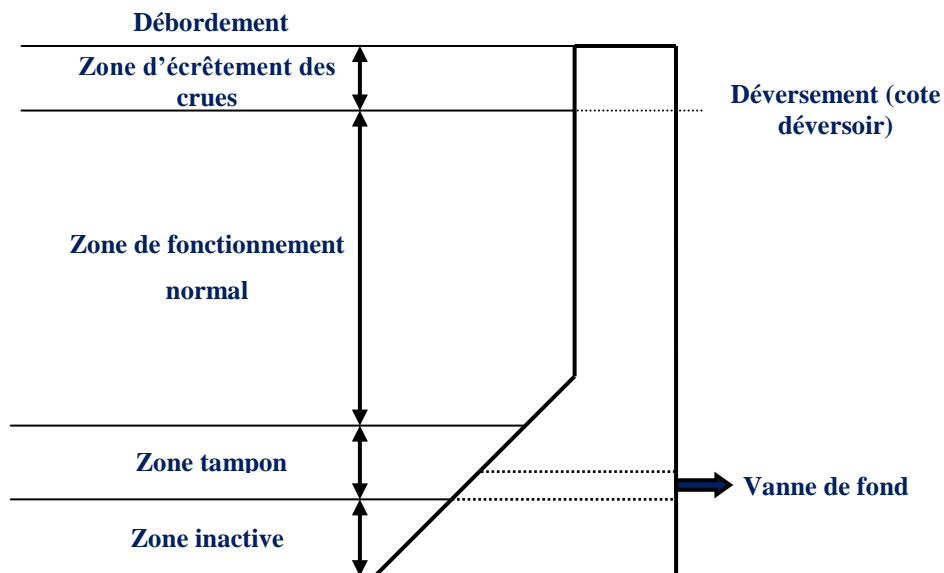


Figure 2 - 8 : Zones de fonctionnement d'un réservoir.

L'étendue des zones de fonctionnement du réservoir varie au cours de l'année (**Figure 2 - 9**), ce qui permet de modéliser des effets tampons plus faibles en périodes critiques. L'objectif du

gestionnaire est donc de se rapprocher le plus possible de la courbe objectif idéale pour éviter les défaillances. Dans la plage de fonctionnement normal, l'expérience du gestionnaire peut lui permettre de mieux gérer le réservoir, sauf bien entendu en période climatique exceptionnelle où il devra prendre des dispositions particulières. Le principal inconvénient de la méthode de courbes objectifs réside dans le fait qu'elle ne fournit pas de directives pour la prise de décisions sur le fonctionnement sous les conditions non idéales.

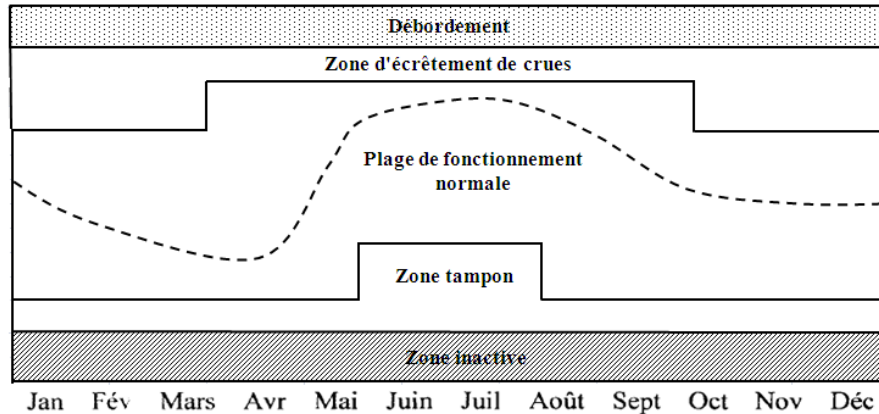


Figure 2 - 9 : Variation des zones de fonctionnement au cours de l'année dans le domaine soudano-sahélien.

2.5.2 Méthodes opérationnelles

L'avancée la plus importante dans le domaine de la gestion des ressources en eau à la fin du XX^{ème} siècle et soutenue par la constante croissance des performances des calculateurs (technologie moderne) a été l'introduction d'une approche d'analyses des systèmes utilisant un ensemble de techniques mathématiques pour l'étude des problèmes de ressource en eau (Jain & Singh, 2003; Simonović, 2009).

Les techniques d'optimisation et de simulation sont des techniques de recherche opérationnelle largement sollicitées pour les problèmes de ressources en eau (Loucks & Van Beek, 2005; Le Ngo, 2006; Suiadee & Tingsanchali, 2007). L'optimisation consiste à rechercher les meilleures stratégies telles que les fonctions critères prennent leurs valeurs optimales tout en respectant d'éventuelles contraintes, tandis que dans la simulation, les comportements du système sont simulés sur la base d'un ensemble de règles régissant le fonctionnement et la gestion des ouvrages (Mckinney & Savitsky, 2003).

2.5.2.1 Méthodes d'optimisation

L'application des techniques d'optimisation du fonctionnement des réservoirs est devenue une préoccupation majeure dans le domaine de la gestion et de la planification des ressources en eau (Le Ngo, 2006; Alemu et al., 2011). Depuis plus de trois décennies, les recherches intensives ont été menées sur l'application des modèles d'optimisation aux systèmes de

réservoirs. Plusieurs auteurs tels Yeh (1985), Labadie (2004), Rani & Madalena (2010) et Singh (2012) ont brossé un état de l'art sur les techniques d'optimisation avec des applications potentielles à la gestion et au fonctionnement des réservoirs.

Ces techniques peuvent être subdivisées en trois catégories : déterministes, stochastiques et heuristiques (Abdullah, 2012). La littérature révèle qu'il n'existe pas d'algorithme général aux problèmes d'optimisation. Cependant, le choix d'une méthode d'optimisation pour un problème donné dépend des caractéristiques du système étudié, de la nature des formulations des fonctions objectifs et des variables, de la disponibilité des données et des contraintes associées (Merdjaoui, 2006).

a) Techniques d'optimisation conventionnelle

Les techniques d'optimisation conventionnelle telles que la programmation linéaire (PL), la programmation non linéaire (PNL) et la programmation dynamique (PD) sont largement utilisées dans le domaine de l'aménagement et de la gestion des systèmes hydro-agricoles et des barrages hydro-électriques (Yeh, 1985; Fang et al., 1989; Simonovic & Burn, 1989; Reznicek & Simonovic, 1990). Toutefois, les techniques PL et PNL sont confrontées aux problèmes d'approximation dans la manipulation des fonctions objectifs discontinues, non-dérivables et non-convexes (Rani & Madalena, 2010). Une autre limite de l'application de PNL est généralement son incapacité à garantir la convergence à la solution optimale (Reddy & Kumar, 2006; Simonović, 2009). Quant à la PD, elle est plus adaptée comme technique de gestion opérationnelle des barrages-réservoirs. Cependant, elle est confrontée aux problèmes de « *dimensionnalité* » lorsqu'elle est appliquée aux systèmes de réservoirs avec un nombre important de variables (Reddy & Kumar, 2006; Nandalal & Bogardi, 2007). Ces méthodes sont facilement piégées dans les optimums locaux et consomment un grand temps de calcul.

Plusieurs questions d'optimisation de la gestion et de la planification des ressources en eau se caractérisent par un nombre trop important de variables de décision et de contraintes pour être facilement résolus en utilisant les méthodes précédemment citées. De nouvelles approches connues sous l'appellation de méthodes évolutionnaires se sont révélées une alternative aux méthodes conventionnelles (Francisci, 2002; Reddy, 2006).

b) Méthodes évolutionnaires : heuristiques et métaheuristiques

Les méthodes de recherche évolutionnaires sont les algorithmes génériques d'optimisation qui s'inspirent généralement d'analogies avec la physique, avec les systèmes biologiques ou encore l'éthologie (Lepagnot, 2011). Ces méthodes ont suscité un très grand intérêt auprès de la communauté scientifique. Elles sont potentiellement aptes à la résolution des problèmes à

grande échelle non convexes, non linéaires, multi-objectifs, discontinus, discrets ou stochastiques. Cependant, ces méthodes peuvent ne pas trouver la solution optimale, et encore moins prouver l'optimalité de la solution trouvée. Elles permettent de déterminer en un temps raisonnable, une solution approchée à un problème d'optimisation lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre efficacement.

On distingue deux catégories de méthodes évolutionnaires : les méthodes à base de solution unique et les méthodes à base de population de solutions (Shabani, 2009; Boussaïd, 2013). La majorité d'entre elles appartiennent à la classe des algorithmes évolutionnaires (AEs) ou à celle de l'optimisation par essaim particulaire (OEP). Nous nous intéresserons dans ce qui suit aux algorithmes évolutionnaires.

Les AEs forment une famille d'algorithmes d'optimisation inspirés de l'évolution biologique des espèces (théorie darwinienne de la sélection naturelle des espèces). Ils sont regroupés en quatre familles : les algorithmes génétiques (Holland, 1975; Goldberg, 1989), les stratégies d'évolution (Schwefel, 1981), la programmation évolutionnaire (Fogel, 1995) et la programmation génétique (Koza, 1992). Ces approches se différencient par leur manière de représenter l'information et par leur façon de faire évoluer la population d'une génération à l'autre (Barichard, 2003).

Parmi ces algorithmes évolutionnaires, les algorithmes génétiques (AGs) sont les plus populaires en raison de leur flexibilité et leur efficacité à optimiser les systèmes complexes, non-linéaires et de grandes tailles (Morley et al., 2001). Leurs applications aux problèmes d'optimisation relatifs à la gestion des réservoirs remontent à la fin du XX^{ème} siècle. La suite de cette partie est consacrée à quelques applications des AGs aux problèmes de gestion des réservoirs surtout en Asie et au Maghreb. A notre connaissance, ces outils n'ont pas encore été appliqués à la gestion des réservoirs en Afrique de l'Ouest.

Oliveira and Loucks (1997) ont développé les AGs pour déduire les politiques ou règles de fonctionnement des systèmes à multi-réservoirs. Les opérateurs génétiques sont appliqués pour générer des ensembles successifs possibles de stratégies de gestion. Chaque stratégie est alors évaluée à travers des simulations pour estimer un indice de performance pour une série donnée d'apports.

Reddy and Kumar (2006) ont développé l'application d'un AG multi-objectif pour déterminer un ensemble de stratégies optimales de gestion d'un système multi-réservoirs à Bhadra en Inde. Ils ont démontré l'utilité des AGs pour un problème réel d'optimisation multi-objectif.

Kumar et al. (2006) ont appliqué un AG au réservoir Malaprabha à vocation agricole en Inde pour obtenir la stratégie de gestion optimale et les allocations optimales de l'eau.

Une synthèse de quelques études récentes appliquant les AGs aux problèmes de gestion des réservoirs est résumée dans le **Tableau 2 - 2**.

Tableau 2 - 2 : Synthèse de quelques études appliquant les AGs aux problèmes de gestion des ressources en eau.

Références	Objectifs de l'étude	Cas d'étude
Nouiri, 2014	Optimiser le planning de la gestion quotidienne d'un système hydraulique	Cas réel d'un système à trois réservoirs de surface (Tunisie)
Cai et al., 2013	Optimiser la gestion des réservoirs pour équilibrer les exigences humaines et écologiques	Barrages de Trois Gorges et Gezhouba, bassin versant Yangtze (Chine)
Chen et al., 2012	Développer une approche innovatrice pour explorer un compromis de solutions entre les intérêts socio-économiques et environnementaux	Réservoir Qingshitan (Chine)
Louati et al., 2011	Optimiser l'allocation des ressources en eau d'un système de réservoirs	Cas réel d'un système de réservoirs (Tunisie)
Chang et al., 2010	Déterminer une stratégie optimale pour aider le processus de prise de décision pour la gestion des réservoirs	Réservoir Shih-Men (Taiwan)

c) Comparaison entre les méthodes conventionnelles et les algorithmes génétiques

Les résultats des travaux d'optimisation de la gestion et de la planification des ressources en eau ont permis de conclure que les méthodes reposant sur la programmation mathématique (PL, PNL, PD) ne donnent pas toujours satisfaction en termes de précision et de temps de calcul. Ces méthodes sont fortement pénalisées par la taille du système étudié.

Les applications des algorithmes génétiques aux problèmes d'optimisation des systèmes de réservoirs, ont permis de confirmer leur efficacité dans la recherche des solutions optimales. De plus, les exigences en temps de calculs demandés par ces méthodes sont largement inférieures à celles des méthodes conventionnelles. Cette qualité attribuée aux algorithmes génétiques leur permet d'être utilisés dans la gestion d'un réservoir en temps réel, ou même d'un système de réservoirs.

Dans l'optique d'optimiser la gestion des petits barrages en Afrique de l'Ouest et dans le bassin de la Volta en particulier, nous avons choisi d'expérimenter l'application des méthodes évolutionnaires notamment, le choix des AGs comme outil d'optimisation. Ce choix nous permettrait de traiter, les problèmes multi-objectifs relatifs aux réservoirs à caractères multi-

usages. Nous reviendrons plus en détails au chapitre 6 sur l'application des AGs à l'hydro-système de Boura. L'organigramme de mise en œuvre des AGs est présenté en **Annexe 6.C**.

2.5.2.2 Modèles de simulation

Les modèles de simulation jouent un rôle important dans l'évaluation, le développement et la gestion des ressources en eau. Ils sont généralement conçus pour juger la réponse d'un système modélisé sous une ou plusieurs configurations particulières imposées : Ce sont des modèles de « *cause à effet* ».

Un modèle de simulation d'un système de ressource en eau reproduit son fonctionnement dans le contexte d'une politique de gestion définie, en utilisant les paramètres des ouvrages physiques et de contrôles, et en s'appuyant sur des séries temporelles de flux d'entrées et de sorties au système (Jain & Singh, 2003).

Depuis les années 1970, de nombreux modèles de simulation ont été développés dans le domaine de la gestion et de la planification des réservoirs. Une synthèse de quelques-uns de ces modèles est présentée au **Tableau 2 - 3**.

Tableau 2 - 3 : Modèles de simulation de la gestion d'un système barrage-réservoir.

Acronyme	Description du nom	Organisation en charge du modèle
HEC-ResSim	Hydrologic Engineering Center Reservoir System Simulation	U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, http://www.hec.usace.army.mil/
AQUARIUS	Modeling System for River Basin Water Allocation	U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, http://www.fs.fed.us/rm/value/aquariusdwnld.html
WEAP	Water Evaluation and Planning	Stockholm Environment Institute at the Tellus Institute, http://www.weap21.org
RiveWare	River and Reservoir Operations Model	Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems, U.S. Bureau of Reclamation, Tennessee Valley Authority, http://riverware.org/
MIKE HYDRO BASIN	River Basin Planning	Danish Hydraulic Institute, http://www.mikebydhi.com

Source : Adaptée de Wurbs (2012)

Les critères tels que l'accessibilité, la disponibilité, la capacité à stocker les données et le degré de difficultés dans la manipulation peuvent orienter le choix d'un outil de simulation. Le facteur le plus restrictif dans l'utilisation des modèles de simulation est souvent l'existence de diverses alternatives possibles à investiguer (Loucks & Van Beek, 2005; Simonović, 2009).

Bien que les techniques de simulation et d'optimisation puissent être utilisées indépendamment pour analyser un problème de gestion opérationnelle, elles sont néanmoins utilisées souvent de façon complémentaire. Ces méthodes sont conjointement mises en œuvre dans l'analyse des systèmes de ressources en eau en général pour obtenir et évaluer les stratégies de gestion alternatives du système considéré (Milutin, 1998). La technique d'optimisation vise alors à réduire le nombre d'alternatives pour les analyses de simulation.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse le modèle WEAP est adopté pour simuler le fonctionnement et le système d'allocation d'eau du réservoir de Boura au Burkina Faso. Il a été sélectionné parmi les autres plateformes parce que WEAP est un outil complet, flexible et d'utilisation aisée pour la planification et l'analyse de divers scénarios de développement et de gestion de l'eau (Yates et al., 2005). C'est aussi un outil « libre » et plusieurs travaux scientifiques ont déjà utilisé WEAP pour l'évaluation de la ressource en eau en Afrique Sub-saharienne.

Jenkins et al. (2005) ont montré l'utilité de WEAP comme un outil d'aide à la décision pour la gestion d'un bassin versant dans un pays en développement. Ils ont utilisé WEAP comme un outil de modélisation participative : les parties prenantes locales du bassin versant de Njoro au Kenya, ont développé avec WEAP une vision partagée des solutions relatives à la gestion de l'eau. Ils ont montré l'utilité de WEAP comme un outil d'aide à la décision pour la gestion d'un bassin versant dans un pays en développement.

De Condappa et al. (2009) ont couplé le modèle WEAP à un modèle hydrologique pour élaborer un outil d'aide à la décision pour la gestion des ressources en eau transfrontalières du bassin de la Volta. Cette étude a analysé les effets possibles de deux types de scénarios (changements climatiques et développement des petits réservoirs en amont du bassin) sur la production hydro-électrique en aval du barrage d'Akosombo au Ghana. Ils ont montré que l'outil développé peut stimuler le dialogue transfrontalier exigé pour une gestion intégrée des ressources en eau du bassin.

Giertz et al. (2010) ont utilisé le modèle WEAP pour analyser différentes situations des ressources en eau du bassin de l'Ouémé au Bénin dans une optique de gestion intégrée. Il ressort des résultats que la pression sur les ressources en eau du Bénin continuera de s'accroître avec la croissance démographique et les changements des conditions socio-économiques. Ils ont montré l'importance du modèle WEAP comme support de gestion durable et intégrée des ressources en eau dans les pays en développement.

Zakari et al. (2011) ont appliqué WEAP pour la gestion des ressources en eau du bassin du fleuve Niger. Les auteurs ont montré le caractère intégré de WEAP et sa capacité de simuler l'allocation des ressources en eau sur la base d'un ensemble de scénarios d'usages.

2.5.3 Méthode de gestion intégrée des ressources en eau au Burkina Faso

La gestion des ressources en eau au Burkina Faso s'effectue dans un contexte marqué par l'irrégularité des précipitations, la recrudescence des poches de sécheresse, la demande croissante en eau et la dégradation des réservoirs et cours d'eau. Cette situation engendre une surexploitation des ressources en eau.

Pour faire face à ces défis, le Burkina Faso a formulé en 1998 un document de *Politique et stratégies en matière d'eau* qui a adopté l'approche de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) comme mode de gestion de l'eau. En effet, la GIRE est un processus qui vise à favoriser le développement et la gestion rationnelle des ressources en eau en garantissant l'accès à l'eau pour tous les usages sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (Rogers & Hall, 2003). Ainsi, la volonté manifeste de la mise en œuvre de la GIRE au Burkina Faso s'est traduite dans la foulée par l'adoption de trois documents majeurs (Ki et al., 2013) :

- la *loi d'orientation relative à la gestion de l'eau* au Burkina Faso, adoptée par l'Assemblée Nationale en février 2001;
- le rapport d'état des lieux des ressources en eau du Burkina et de leur cadre de gestion publié en mai 2001 ;
- le *Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau* (PAGIRE) du Burkina Faso, adopté en mai 2003. Ce plan s'étend sur deux phases de 2003 à 2009 et de 2010 à 2015.

Pour la mise en œuvre de la GIRE, quatre niveaux géographiques d'intervention ont été définis pour l'ensemble du territoire national :

- Niveau "national" à travers les structures telles que le Conseil National de l'Eau (CNEau), le Comité Technique de l'Eau (CTE), le Secrétariat Permanent du PAGIRE (SP/PAGIRE) et les directions générales du MAH en charge de l'eau et de l'assainissement;
- Niveau "bassin hydrographique" avec pour cadre de gestion les agences de l'eau. Ainsi, cinq agences de l'eau ont été mises en place (Nakanbé, Mouhoun, Cascades, Gourma et Liptako). Ces agences de l'eau sont dotées des outils spécifiques de planification tels que le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

(SDAGE). Les limites des bassins hydrographiques nationaux sont matérialisées à la *Figure 2 - 2* ;

- Niveau "régional" avec pour instance de gestion les services des Ressources en Eau dans les Directions régionales de l'Agriculture et de l'Hydraulique et les Comités Inter-Service sur l'Eau pour leur appui-conseil aux communes. Ils disposent les outils de planification tels que Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE).
- Niveau "local" avec pour cadre de gestion les Comités Locaux de l'Eau (CLE) dotés des Plans de Gestion de l'Eau (PGE). A ce jour, on dénombre 32 CLE repartis dans les 5 espaces de gestion (MAHRH, 2010; Ki et al., 2013).

Des outils sont conçus ou sont en cours d'élaboration pour encadrer l'opérationnalisation de la GIRE. Il s'agit des outils tels que : le SDAGE, le SNIEau, le modèle de gestion et la police de l'eau. Ces outils sont plus des principes que des outils opérationnels car ne définissent pas clairement les méthodes pour atteindre les objectifs fixés.

Pendant la phase 1 du PAGIRE, les CLE ont été préalablement identifiés comme organes de gestion à l'échelle locale des retenues d'eau. Cependant, le nombre élevé des ouvrages de collecte des eaux et le manque des moyens financiers ont constitué une limite à l'opérationnalisation des CLE relevée dans la phase 2. Aussi, les CLE n'ont pas donné satisfaction au regard des questions concernant l'accès à l'eau et l'allocation de l'eau, qui sont cruciaux pour le bon fonctionnement des réservoirs. Les CLE sont devenus des plates-formes de consultation, de mobilisation et de promotion de la gestion de l'eau à l'échelle des sous-bassins (Roncoli et al., 2009; Sally et al., 2011; Cherlet and Venot, 2013). Trois catégories d'acteurs interviennent dans un CLE : l'administration publique à travers ses services déconcentrés, les collectivités territoriales (communes, préfectures, province, région) et les autres acteurs (usagers directs, ONG, secteur privé, etc.).

Les acteurs de développement ont affirmé la primauté des Associations des Usagers de l'Eau (AUE), comme entités uniques et adéquates pour le maintien et la gestion des petits réservoirs et pour accroître leurs performances (IFAD, 2009). Ces associations sont supposées inclure tous les usagers du réservoir : les groupements des irrigants, des éleveurs et des pêcheurs. Cependant, ces associations ne découlent pas d'un processus décisionnel collectif émergent de la communauté et ne semblent pas être aussi participatives que prévu (Venot & Krishnan, 2011; Venot et al., 2012). De plus, ces associations ne disposent pas d'outils opérationnels de gestion et manquent des capacités scientifiques, techniques et managériales nécessaires pour accomplir leur mission (Sally et al., 2011). La problématique de la connaissance des ressources en eau des réservoirs et de tous les aspects liés à leurs usages reste d'actualité.

Conclusion partielle du chapitre 2

Le développement des barrages dans le monde est lié à la nécessité de stocker de l'eau pour prévenir la variabilité saisonnière ou interannuelle des écoulements de plus en plus marquée dans un contexte de changement climatique. Les barrages servent aussi à réduire les effets des inondations (écrêtements de crues) et à protéger les populations riveraines. Les réservoirs sont sollicités à des fins multiples telles que la production d'énergie hydroélectrique, la fourniture d'eau à usage agricole, industriel, pastoral, halieutique ou domestique et la satisfaction de la demande écologique.

En Afrique de l'Ouest, l'édification de nombreux barrages et en particulier des petits barrages a contribué à booster le développement d'une multitude d'activités agro-sylvo-pastorales, et surtout à redynamiser la vie paysanne. Le Burkina Faso a l'apanage du plus grand nombre de ces infrastructures. Le recensement de 2011 donne un nombre de 1806 réservoirs d'eau. Les petits barrages sont des aménagements à buts multiples. Ils offrent de multiples opportunités d'accroissement des moyens de subsistance dans les régions rurales et d'amélioration de la sécurité alimentaire des usagers permettant ainsi une sédentarisation des populations riveraines et une attraction des nouvelles populations. Les petits barrages apparaissent donc comme un vecteur de changement social des milieux ruraux soudano-sahéliens d'Afrique de l'Ouest. Cependant, un certain nombre de contraintes de gestion minent leur valorisation optimale.

La gestion des barrages se fait à travers plusieurs approches : des plus simplistes (méthodes empiriques) aux plus sophistiquées (optimisation et simulation) en passant par l'approche GIRE. En Afrique de l'Ouest, l'application des méthodes sophistiquées est encore très peu développée et le processus de la mise en œuvre de la GIRE demeure encore le plus souvent à un stade embryonnaire.

L'un des objectifs de cette thèse est d'explorer l'application des outils modernes à la gestion optimale des petits barrages. Pour ce faire, le barrage de Boura situé au Sud du Burkina Faso a été choisi comme site pilote, illustratif de nombre des petits barrages du bassin de la Volta soumis aux mêmes contraintes. La description de l'hydro-système étudié est l'objet du chapitre 3.

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA ZONE D'ÉTUDE



Ce chapitre subdivisé en deux parties, présente, d'une part, les éléments du milieu physique du bassin versant en amont du barrage de Boura, et, d'autre part, son environnement socio-économique.

3.1 Cadre naturel et physique

3.1.1 Situation géographique de la zone d'étude

Le village de Boura situé à 210 km au sud de la ville de Ouagadougou et à 200 km à l'est de la ville de Bobo-Dioulasso se trouve dans la région du Centre-Ouest, dans la province de Sissili. Le village se situe sur la route Léo-Diébouyou qui longe la frontière ghanéenne. Le terroir de Boura qui s'étend sur un rayon d'environ 8 km est limité par les terroirs suivants :

- à l'ouest, par le village de Bouara,
- à l'est, par le village de Ty,
- au sud, par la république du Ghana,
- au sud-est par le village de Poudiéné,
- et au nord, par les villages de Goumou et Samon.

Le barrage de Boura est implanté à proximité nord du village de Boura, à environ 500 m de la route nationale n°20. Ses coordonnées géographiques au niveau du déversoir sont : latitude 11°02'56" nord et longitude 02°29'56" ouest. Le réservoir de Boura est une retenue d'eau permanente, accessible en toute saison, à caractère multi-usages, située à proximité des riverains et disposant des systèmes de production mixte. Il est représentatif des petits barrages dans le bassin de la Volta.

Le bassin versant du barrage de Boura (*Figure 3 - 1*) situé entre les parallèles 10°56'11" et 11°04'29" de latitude nord, et les méridiens 02°22'04" et 02°30'13" de longitude ouest, est à cheval entre le Burkina Faso et le Ghana (Upper West Region). Il a une superficie de 150 km² circonscrite par un périmètre de 60 km. En aval du barrage, les eaux rejoignent l'affluent principal rive gauche de la Kabarvaro qui se jette dans le fleuve Mouhoun (ex Volta Noire).

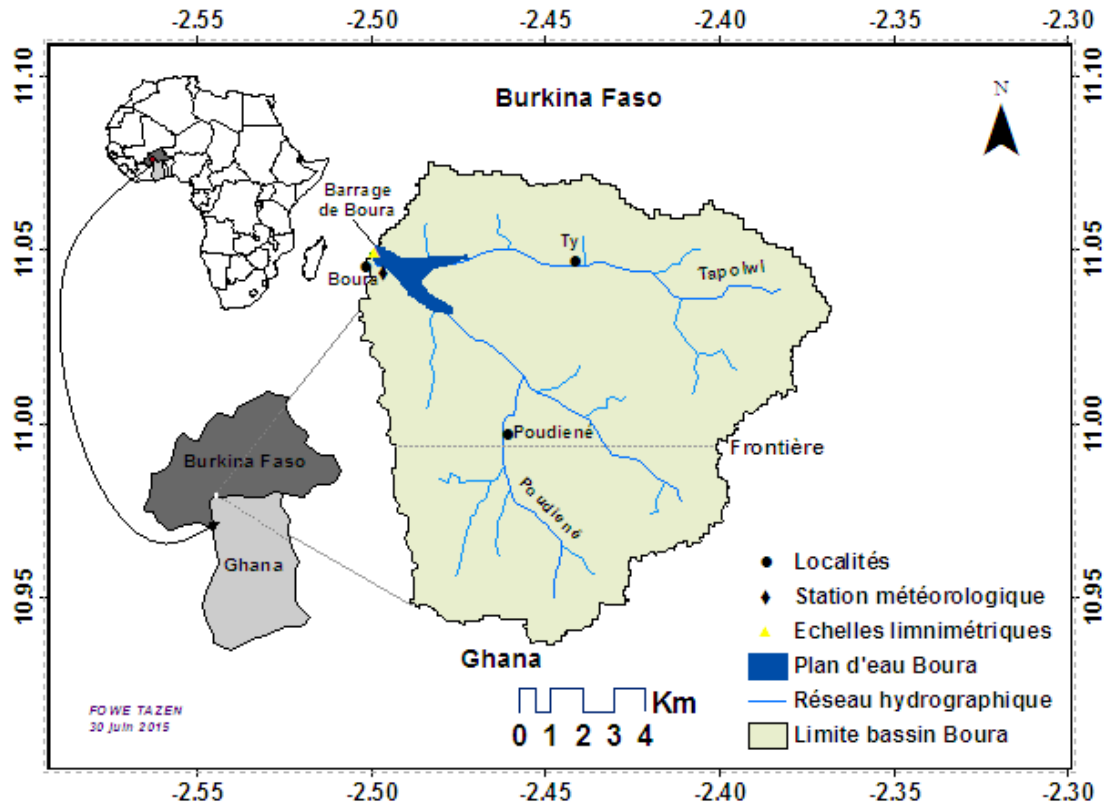


Figure 3 - 1 : Localisation géographique du bassin versant de Boura.

3.1.2 Régime climatique

Comme pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et du bassin de la Volta, le mécanisme climatique repose principalement sur l'interaction sol-atmosphère-océan (Lafore et al., 2010) qui détermine la dynamique au sein de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) sur la région. La ZCIT est la zone de rencontre de deux masses d'air : l'air continental tropical, chaud et sec, venant du secteur nord-est à est originaire de l'anticyclone saharien, appelé l'Harmattan ; et l'air équatorial maritime, humide et instable, originaire de l'anticyclone de S^{te} Hélène, appelé la Mousson. Ces deux masses d'air circulent dans les basses couches atmosphériques (*Figure 3 - 2*).

En Afrique de l'Ouest, le Front Intertropical (FIT) se déplace sur un axe Nord-Sud au cours de l'année. Ce déplacement du FIT gouverne l'alternance des deux saisons (saison sèche et saison des pluies). Le FIT prend sa position la plus septentrionale aux alentours de 20°N (Tombouctou) en juillet-août au cœur de la saison des pluies et sa position méridionale vers 5°N (dans l'océan) en janvier-février en pleine sèche (Ouédraogo, 2001; Penide, 2010).

Le territoire burkinabè est sous l'influence de la mousson pendant la saison pluvieuse et sous l'influence de l'harmattan en saison sèche. La commune de Boura est située dans le domaine dit nord soudanien (Ibrahim, 2012). Cette zone se caractérise par une saison pluvieuse de 5 à

6 mois de mai à septembre (ou octobre) et une saison sèche de 6 à 7 mois d'octobre (ou novembre) à avril.

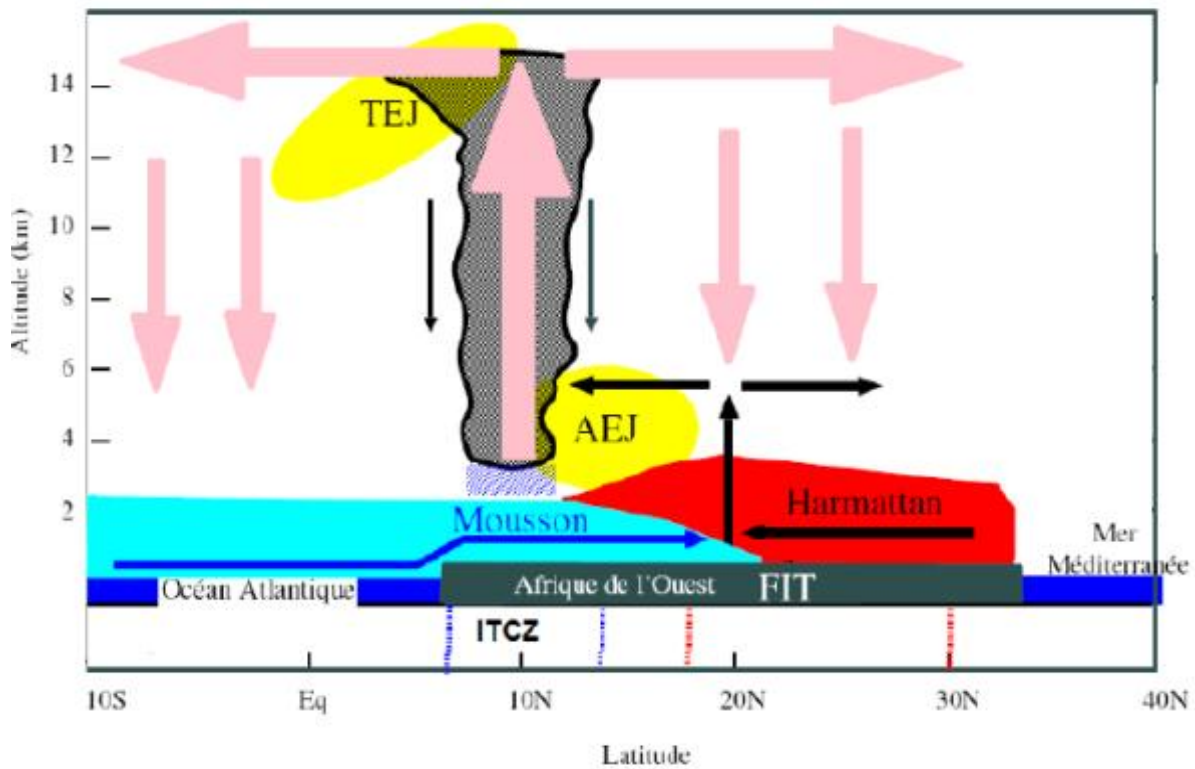


Figure 3 - 2 : Schéma du mécanisme climatique de l'Afrique de l'Ouest avec deux autres grands courants d'air : African East Jet (AEJ) et Tropical East Jet (TEJ) (d'après Peyrillé, 2006).

3.1.2.1 Etude de la pluviométrie

a) Précipitations annuelles et variations annuelles

La pluviométrie annuelle est une variable très couramment étudiée pour caractériser l'évolution climatique en Afrique. La série chronologique de la pluviométrie mensuelle analysée dans le cadre de cette étude est celle du poste pluviométrique à Boura (02°30'W-11°03'N). Elle est fournie par le service météorologique du Burkina Faso et s'étale sur la période 1961 à 2010. Sur cette période, la hauteur pluviométrique annuelle moyenne est de 920 mm à Boura. Elle se caractérise par une variabilité interannuelle avec un coefficient de variation de 17%.

L'évolution des indices de la pluviosité annuelle comme celui utilisé par Lamb (1982) et Nicholson (1983) permet d'apprécier les fluctuations pluviométriques dans la zone d'étude (**Figure 3 - 3**). Cet indice standardisé qui, représente la variable centrée réduite associée aux précipitations annuelles sur la période 1961-2010 au poste d'observation à Boura, permet de distinguer les années humides ou excédentaires, des années sèches ou déficitaires. On observe donc un déficit pluviométrique sur la période 1970-2003 avec quelques années

exceptionnelles 1989 et 1991 relativement humides, et une légère reprise des années humides après 2004.

Les variations relatives de la pluviométrie moyenne par décennie confirment une baisse de la pluviosité à Boura vers 1970, très prononcée sur les décennies 70 et 80 (*Tableau 3 - 1*). Cette observation corrobore des études antérieures (Paturel et al., 1998; L'Hote et al., 2002) quant à la singularité des décennies 1970 et 1980 à la diminution sensible des précipitations en Afrique de l'Ouest. Le test statistique de Pettitt (1979) et la méthode de segmentation hydrométéorologique (Hubert et al., 1989) appliqués à la série des pluies annuelles à Boura confirment une anomalie dans la série avec une date de rupture probable en 1969. La procédure de segmentation de Hubert met en exergue deux périodes homogènes 1961-1969 et 1970-2010 avec des hauteurs de pluie annuelles moyennes respectives de 1078,6 et 883,7 mm, avec un déficit pluviométrique de l'ordre de 18%.

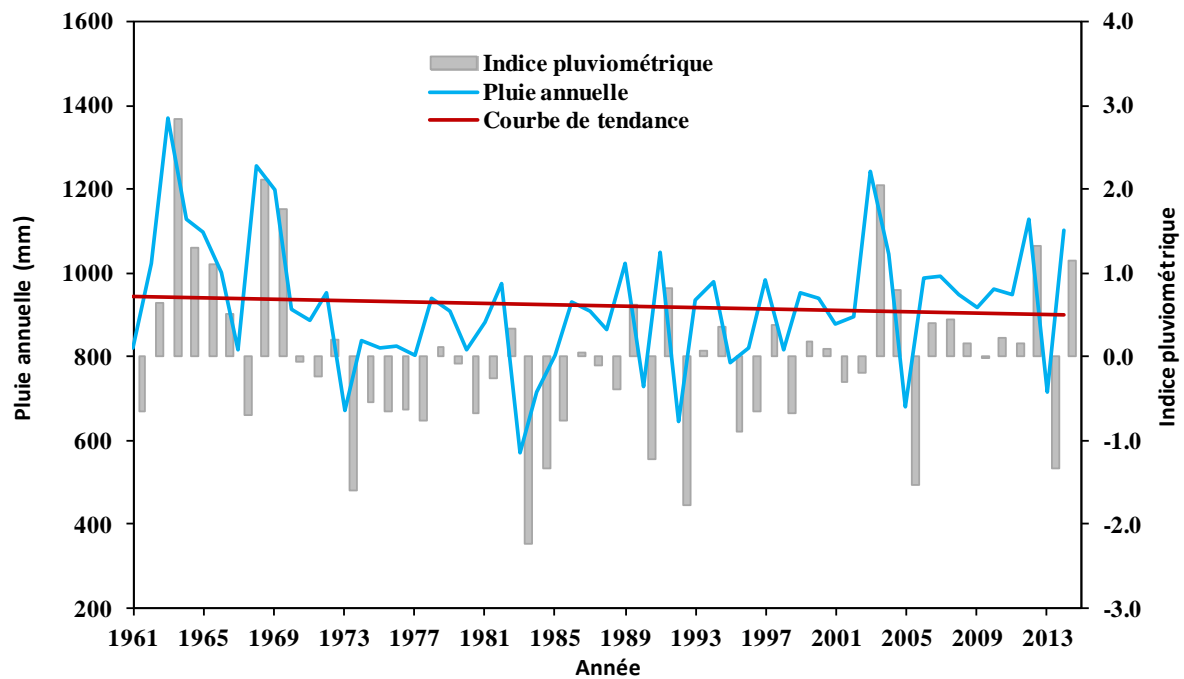


Figure 3 - 3 : Evolution de la pluie annuelle et des indices pluviométriques à Boura sur la période 1961-2010.

Tableau 3 - 1 : Variations relatives des pluies moyennes annuelles par décennie par rapport à la moyenne des pluies annuelles de la période 1961-2010.

Décennie	Pluie moyenne interannuelle (mm)	Variation relative (%)
1961-1970	1062,2	15,6
1971-1980	846,7	-7,9
1981-1990	840,0	-8,6
1991-2000	890,7	-3,1
2001-2010	955,1	3,9

b) Variations mensuelles et saisonnières des précipitations

L'installation de la saison des pluies est plus étalée et irrégulière que la fin de la saison. C'est pour cela qu'une dissymétrie est observée sur les diagrammes pluviométriques des paramètres statistiques à l'échelle mensuelle. La répartition mensuelle des précipitations est unimodale avec un maximum centré en août (**Figure 3 - 4**), qui représente 25% à 40% du total annuel sur la période 1961-2010. La période la plus sèche s'étend de novembre à février.

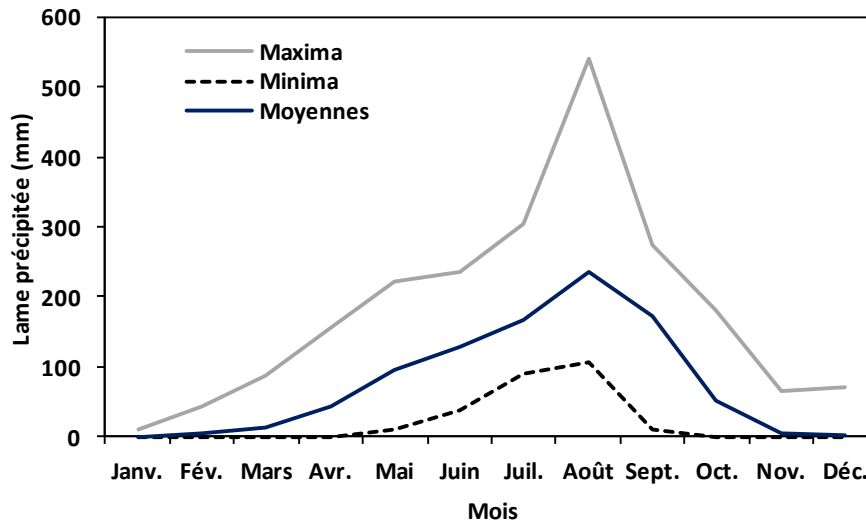


Figure 3 - 4: Répartition mensuelle moyenne des précipitations à Boura (1961-2010).

3.1.2.2 Autres paramètres climatiques

Les paramètres climatiques tels que le vent, la température de l'air, l'humidité relative et l'évaporation ont une influence sur le cycle hydrologique. La description généralisée de ces paramètres se base sur des valeurs moyennes. Néanmoins, des perturbations locales telles que le relief et la végétation peuvent modifier leurs comportements. En l'absence des données historiques de ces paramètres sur la zone d'étude (à Boura se trouve un simple poste pluviométrique qui n'enregistre pas ces informations), les données observées au niveau de la station synoptique de Pô, qui est située à une distance d'environ 150 km à l'est de Boura, et qui se trouve dans la même zone climatique (11°10'N) et à une altitude comparable (326 m) seront utilisées dans cette étude.

a) Températures

De l'analyse des températures de la station de Pô sur 3 décennies (1979-2010), il ressort que la moyenne annuelle des températures de l'ordre de 28 °C. Les températures moyennes mensuelles (**Figure 3 - 5a**) présentent deux maximums : l'un en fin de saison sèche (avril) et le plus élevé (31,5 °C), et l'autre qui est moins élevé (27,8 °C) en fin de saison pluvieuse (octobre). La valeur la moins élevée de la température minimale absolue est observée en

février, tandis que la valeur la plus élevée de la température maximale absolue est observée en avril/mai.

b) Humidité relative

L'humidité relative moyenne (**Figure 3 - 5b**) est très faible en saison sèche (20 à 40 % entre novembre et mars). Les valeurs mensuelles de l'humidité relative oscillent entre un minimum en saison sèche pendant la période de l'harmattan (janvier-février) et un maximum en saison des pluies. Elle croît régulièrement dans le même sens que la pluviométrie jusqu'à son maximum en août (70 à 80%) et décroît rapidement à partir d'octobre.

c) Insolation

L'insolation varie surtout en fonction de la saison. Des facteurs comme la brume, la nébulosité, le brouillard et les poussières agissent négativement sur les durées d'insolation (Amri, 2013). La durée de l'insolation varie de 6 heures en saison humide (août, mois le moins ensoleillé) à 10 heures en saison sèche (**Figure 3 - 5c**). La valeur maximale du rayonnement global observée sur la période 1985-1996 est de 2700 joules/cm²/jour. Cependant, les valeurs inférieures à 1000 joules/cm²/jour sont rares.

d) Vents

Les vitesses du vent sont relativement faibles (0,9-2,2 m/s en moyenne mensuelle), avec des valeurs excédant rarement 5 m/s. Elles passent par un minimum en septembre ou octobre (**Figure 3 - 5d**). Le vent diurne en période sèche (harmattan) joue un rôle déterminant pour les processus évaporatoires.

e) Evapotranspiration potentielle (ETP)

La variabilité interannuelle de l'ETP est très faible (Riou, 1975). Le coefficient de variation est de 3%. Le minimum de l'ETP est enregistré en août, tandis que le maximum est observé en mars (**Figure 3 - 5e**). La valeur moyenne annuelle de l'ETP est de 1900 mm, c'est-à-dire presque deux fois plus que les apports pluviométriques.

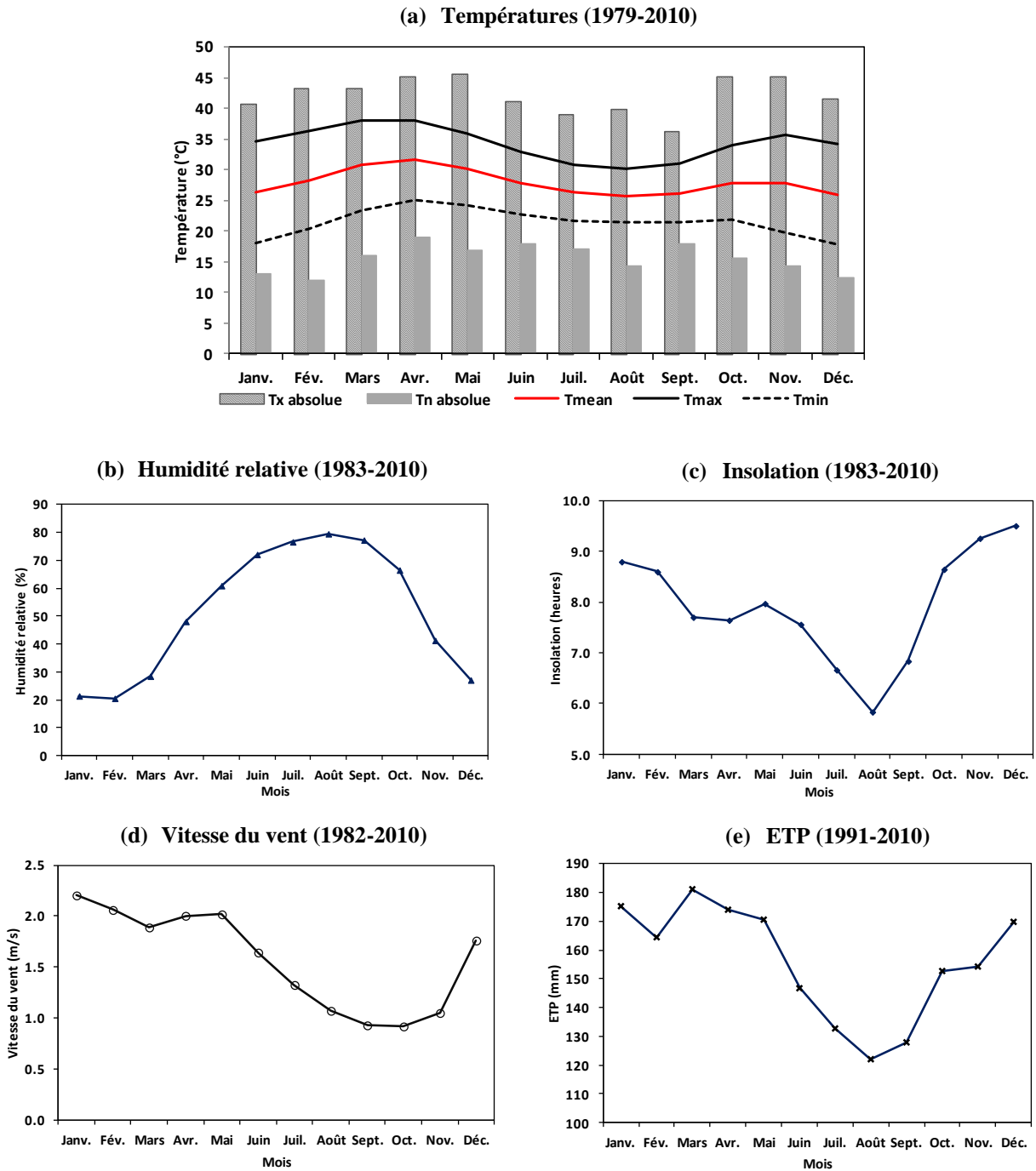


Figure 3 - 5 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de certains paramètres climatiques à Pô : (a) température, (b) humidité, (c) insolation, (d) vitesse du vent et (e) ETP.

Source : Direction Générale de la météorologie du Burkina Faso

3.1.3 Description de l'hydro-système

3.1.3.1 Bassin versant en amont du barrage de Boura

Le bassin versant du barrage de Boura (10°56'11" et 11°04'29" de latitude nord, et 02°22'04" et 02°30'13" de longitude ouest) est un bassin versant transfrontalier dont la partie nord (67%) se situe au Burkina Faso et la partie sud (33%) au Ghana.

a) Caractéristiques morphométriques

L'étude morphologique a pour objectif de déterminer les paramètres physiques du bassin versant. Ces paramètres, notamment la superficie, la forme, la pente et le relief interviennent souvent de façons combinées dans les processus de génération des écoulements (Krimil, 2009; Zannou, 2011).

▪ La forme

Plusieurs facteurs sont utilisés dans la littérature pour caractériser la forme d'un bassin versant (Zavoianu, 1985). L'indice de compacité encore appelé coefficient de Gravelius (K_G) introduit par Luchisheva (1950) permet de décrire la forme du bassin. Il représente le rapport du périmètre du bassin au périmètre d'un cercle de superficie équivalente, et s'obtient à partir de l'équation (3.1) :

$$K_G = \frac{P_{bv}}{2\sqrt{\pi S_{bv}}} \quad (3.1)$$

Où P_{bv} est le périmètre du bassin versant [km] et S_{bv} sa superficie [km^2].

C'est une grandeur adimensionnelle, supérieure ou égale à 1. Ce coefficient est égal à l'unité lorsque la forme du bassin est un cercle parfait, vaut 1,13 pour un carré et peut excéder 3 pour des bassins très allongés. Pour notre cas, $K_G = 1,38$ et le bassin présente une forme compacte.

▪ Le rectangle équivalent

Mis au point par Roche (1963), le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius permet de comparer des bassins versants entre eux, du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. On assimile le bassin versant à un rectangle de longueur L_r et de largeur l_r , ayant le même indice de compacité et la même superficie. C'est une transformation purement géométrique qui aboutit à la formule :

$$L_r = \frac{K_G \sqrt{S_{bv}}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right] \quad (3.2)$$

Pour le bassin versant du barrage de Boura, on trouve : $L_r = 23,68$ km et $l_r = 6,32$ km

▪ L'indice global de pente I_g

Cet indice permet de déduire la nature du relief et de tenir compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique du bassin versant. Il est défini par le rapport :

$$I_g = \frac{D}{L_r} \quad (3.3)$$

Où D est la dénivelée ou la distance qui sépare les altitudes correspondant respectivement à 5% et à 95% de la superficie au-dessus d'elles. Cet écart est observé sur la courbe hypsométrique (*Figure 3 - 6*). Pour notre cas, $I_g = 1,94$ m/km.

- **La dénivelée spécifique D_s**

Elle est définie par la relation :

$$D_s = I_g \sqrt{S_{bv}} \quad (3.4)$$

Pour notre cas, $D_s = 23,80$ m ; D'après la classification du *Tableau 3 - 2*, le bassin versant du réservoir de Boura se trouve dans la classe R2 correspondante à un relief faible.

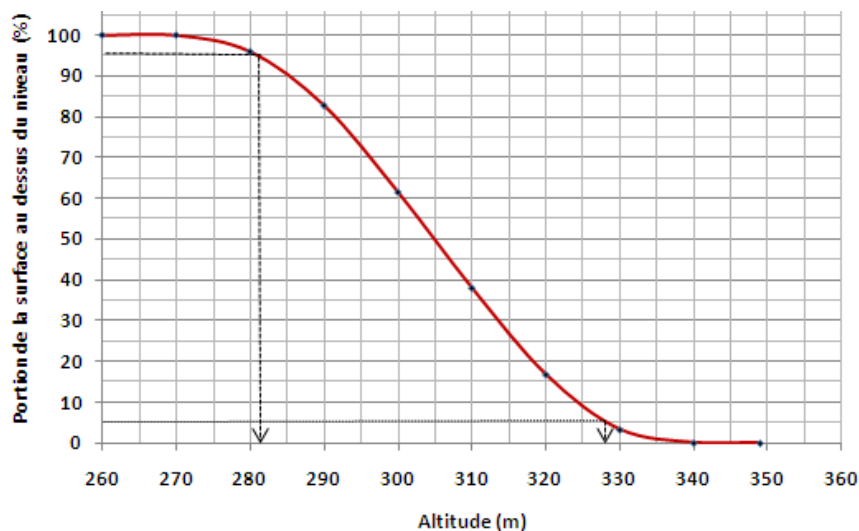


Figure 3 - 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la retenue de Boura.

Tableau 3 - 2: Classes de relief des bassins versants (d'après FAO, 1996).

Ds (m)	< 10	10--25	25--50	50--100	100--250	250--500	>500
Relief	Très faible	Faible	Assez faible	Modéré	Assez fort	Fort	Très fort
Classe	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7

- **La densité de drainage D_d**

Elle est définie comme la longueur moyenne du réseau hydrographique par kilomètre carré de l'aire du bassin versant (S_{bv}). Ce paramètre est utile pour l'étude des crues.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S_{bv}} \quad (3.5)$$

Pour notre cas, $D_d = 0,47 \text{ km/km}^2$.

Les principales caractéristiques morphométriques du bassin versant de la retenue de Boura sont récapitulées dans le **Tableau 3 - 3**.

Tableau 3 - 3 : Caractéristiques géométriques et morphométriques du bassin versant du barrage de Boura.

Paramètres	Unités	Symboles	Valeurs
Superficie du bassin versant	km ²	S	150
Périmètre du bassin versant	km	P	60
Altitude minimale	m	H _{min}	258
Altitude moyenne	m	H _{moy}	300
Altitude maximale	m	H _{max}	351
Altitude à 5%	m	H _{5%}	328
Altitude à 95%	m	H _{95%}	282
Indice de compacité	-	K _G	1,38
Indice global de pente	m/km	I _g	1,94
Dénivelée	m	D	46
Dénivelée spécifique	m	D _s	23,80
Longueur rectangle équivalent	km	L	23,68
Largeur rectangle équivalent	km	l	6,32
Longueur du thalweg principal	km	L _{tp}	14,07
Densité de drainage	km/km ²	D _d	0,47
Classe de relief	R2 (relief faible)		

b) Topographie et hydrographie

La carte topographique (**Figure 3 - 7**) du bassin a été élaborée à partir des données ASTER-GDEM⁴ (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model) du ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center) à une résolution spatiale d'une seconde d'arc (environ 30 m).

Le bassin versant de la retenue de Boura est une vaste plaine peu accidentée et dominée par de petites ondulations de faibles pentes à majorité inférieures à 3%. Cette monotonie du relief est interrompue par des collines de faibles altitudes avec un point culminant à 351 m et l'exutoire

⁴ <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>

au niveau de la digue à 258 m. La répartition hypsométrique du bassin (*Figure 3 - 6*) montre que 95% du bassin est au-dessus de l'altitude 282 m et 5% du bassin au-dessus de l'altitude 328 m. L'altitude médiane (305 m) du bassin est lue sur la *Figure 3 - 6* au point correspondant à l'ordonnée de 50% de la superficie totale.

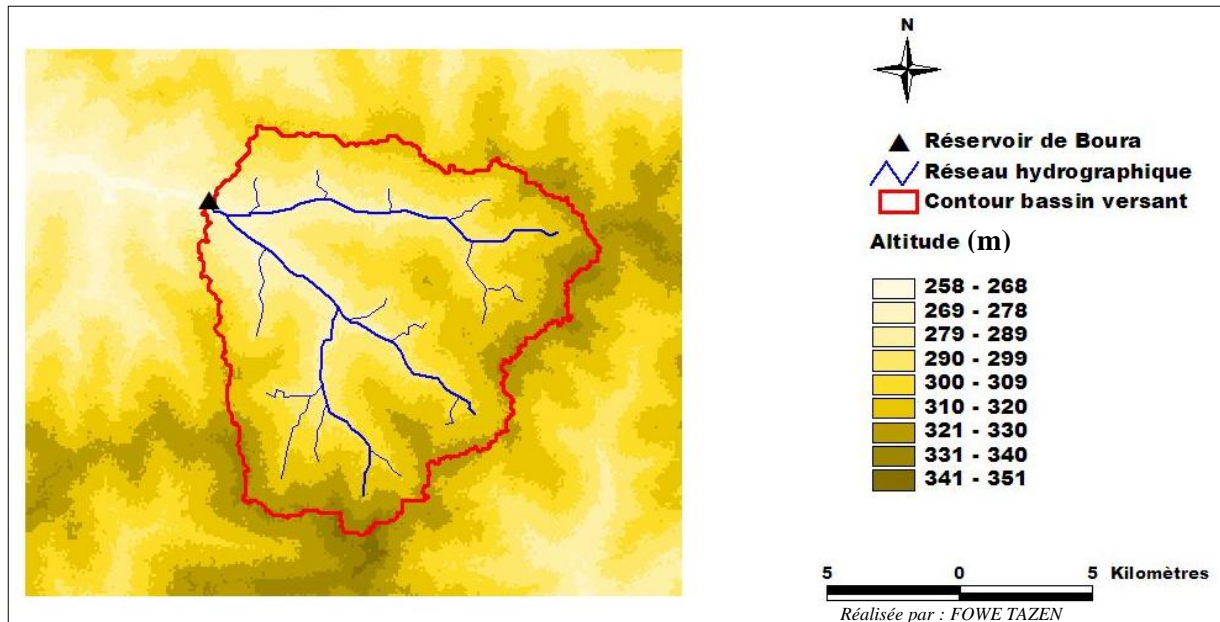


Figure 3 - 7 : Topographie et réseau hydrographique du bassin versant de la retenue de Boura.

Le réseau hydrographique du bassin versant de la retenue est assez individualisé et constitué de deux cours d'eau non pérennes « Tapolwi » et « Poudiénié » caractérisés par un assèchement rapide et total au début de la saison sèche et une reprise des écoulements pendant la période d'hivernage (*Figure 3 - 8*). Le cours d'eau principal « Tapolwi », d'une longueur de 14,07 km, s'étale de l'est vers l'ouest, et le cours d'eau secondaire « Poudiénié » canalise depuis le Ghana les eaux d'écoulement du sud-est vers le nord-ouest. Les ressources en eau souterraine semblent assez importantes au regard de la proximité de la nappe phréatique (20 m en zone élevée et moins de 10 m en zone de bas-fonds) en saison sèche.



(a): Saison sèche (Avril 2013)



(b): Saison humide (Août 2013)

Figure 3 - 8 : Intermittence des écoulements sur le cours d'eau Poudiéné à Boura (Photos : FOWE T.).*c) Hydrologie*

Le bassin versant du barrage de Boura est un bassin non jaugé c'est-à-dire qu'il ne dispose d'aucune information hydrométrique en terme de suivi des niveaux du plan d'eau et des cours d'eau. L'étude hydrologique préliminaire à la construction du barrage de Boura était basée sur les résultats obtenus de l'étude hydrologique de bassins versants représentatifs expérimentaux (Klein, 1967). L'estimation des débits de crues décennales avait été faite par application de la méthode de Rodier et Auvray (1965). Ainsi, les caractéristiques de l'hydrogramme de la crue décennal étaient les suivantes :

- Le débit de pointe décennal et le débit moyen ont été estimés respectivement à $63 \text{ m}^3/\text{s}$ et $43,5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Les temps de base et de montée ont été estimés respectivement à 34 h et 6 h.

d) Géologie

Les observations faites sur la carte géologique au 1/200 000 du degré carré de Léo du Projet SYSMIN⁵ (Kote et al., 2003) montrent des formations constituées de granites à biotite et parfois amphibole avec des intercalations de dolérite. La géologie des forages dans la province de Sissili issue de la base de données de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso montre que les formations se composent essentiellement de roches plutoniques (granites) à filon de quartz ou à filon de pegmatite. Ces observations ont été confirmées par les affleurements rocheux sur le site d'étude. Le substratum géologique du bassin versant de la retenue de Boura est occupé par les roches du socle datant du Précambrien D (Antébirimien).

⁵ Projet de cartographie géologique de reconnaissance du Burkina Faso à l'échelle 1/200 000

e) Pédologie

La nature du sol sur le bassin est conditionnée par la géologie. Une étude pédologique de l'aval du barrage de Boura a été effectuée par le Bureau National des Sols du Burkina Faso (BUNASOLS, 1993). Cette étude a permis de mettre en évidence trois types de sol sur le périmètre en aval du barrage de Boura. Ces sols sont susceptibles d'être présents sur le bassin en amont (**Figure 3 - 9**). Il s'agit :

- Les sols hydromorphes à pseudogley d'une profondeur supérieure à 120 cm. C'est le type de sol dominant, cependant, leur fertilité est faible dans l'ensemble, aussi ces sols tendent à s'acidifier. Ils sont caractérisés par des phénomènes de réduction liés à une saturation temporaire de la nappe provoquant un déficit en oxygène ;
- Les sols ferrugineux tropicaux lessivés (ou lixisols) à tâches et concrétions d'une profondeur de 80 à 120 cm. Ils sont aussi considérés de fertilité moyenne ;
- Les sols peu évolués d'apports alluviaux et colluviaux (ou vertisols). D'une fertilité moyenne, leur profondeur dépasse rarement 120 cm.

Ces sols sont pauvres en éléments fertilisants et présentent une mauvaise structure (Dembelé & Somé, 1991).

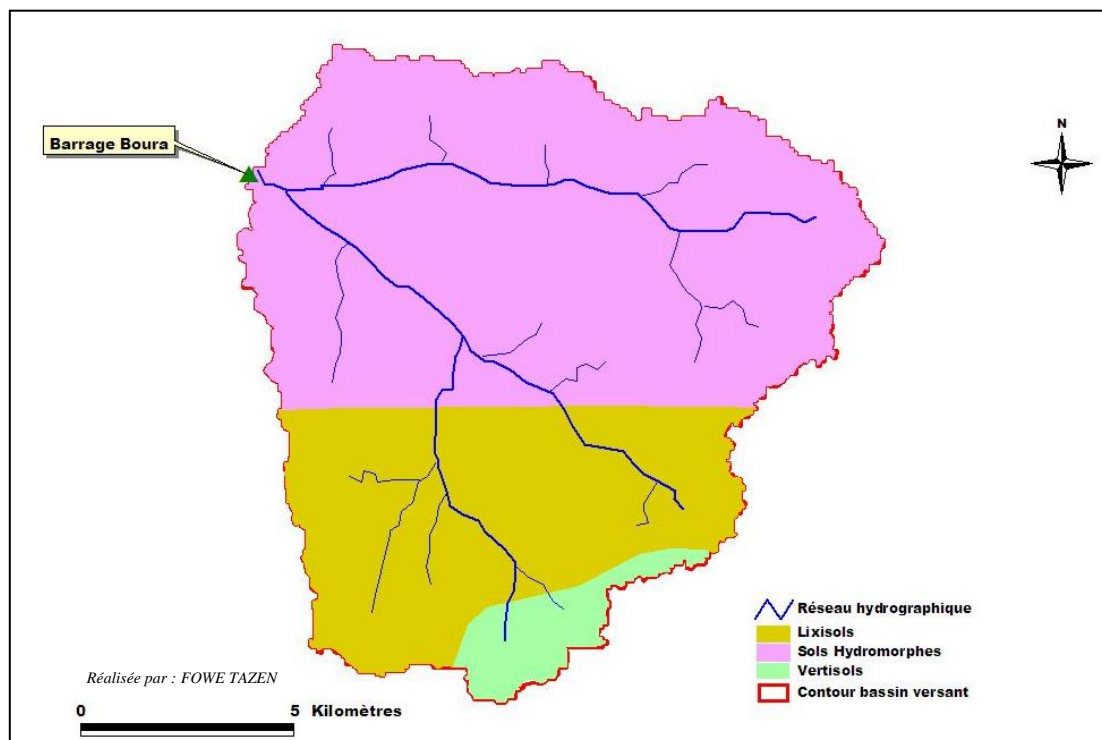


Figure 3 - 9 : Carte pédologique du bassin versant drainant la retenue de Boura.

f) Végétation

Le bassin de Boura se trouve dans le domaine sud soudanien. La végétation est essentiellement constituée des formations secondaires qui sont issues de végétations denses

telles que les forêts, les prairies et les savanes boisées. D'après le Plan Communal de Développement (PCD) de Boura (PNGT2, 2007), on distingue la savane arborée, la savane arbustive et les formations anthropiques.

- **La savane arborée**

Ce type de végétation est composé d'arbres dont les hauteurs varient entre 7 et 12 m, avec un tapis graminéen très important. On y rencontre les espèces suivantes : *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Lannea acida*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Anogeissus leiocarpus*, *Isobertia doka*, *Burkea africana*, etc.

- **La savane arbustive**

Cette formation est dominée par les arbres de moins de 7 m de hauteur. Les espèces ligneuses fréquemment rencontrées sont : *Vitellaria paradoxa*, *Combretum glutinosum*, *Detarium microcarpum*, *Isobertia doka*. Elle se rencontre surtout sur les collines, les buttes cuirassées, les buttes rocheuses et les plateaux cuirassés.

La forte pression démographique manifestée par le développement croissant des activités agro-pastorales, perturbe sérieusement l'équilibre des formations végétales. Les actions de l'homme sur la végétation se résument au défrichage de grandes superficies de terres, au surpâturage et surtout à la coupe excessive et intensive du bois. Néanmoins, des efforts de reconstitution du capital végétal ont été consentis à travers la création des zones classées dans la province de la Sissili (Napon, 2013).

g) Occupation du sol

La **Figure 3 - 10** donne un aperçu des différentes unités d'occupation du sol du bassin drainé par le barrage de Boura. Elle est issue du traitement de la scène satellitaire (Row : 95 et Path : 152) du 11 Octobre 2013 du capteur Landsat 8 OLI-TIRS (Operational Land Imager-Thermal InfraRed Sensor). Ces images de haute résolution spatiale (30 m) sont téléchargeables sur le site web de Global Land Cover Facility (GLCF⁶). La procédure méthodologique adoptée pour le traitement de cette image à l'aide des logiciels de traitement d'image (ENVI 4.3) et de cartographie (ArcView3.2a et ArcGIS Desktop version 10) est synthétisée dans l'organigramme en **Annexe 3.A**. Une enquête terrain de 2 semaines (du 04-15 Novembre 2013) a permis de valider les unités d'occupation du sol. Le choix des unités repose sur la nomenclature de CORINE Land Cover. Il ressort des observations de terrain et du traitement de l'image que le bassin versant du barrage de Boura demeure peu dégradé (faible pourcentage des sols parfaitement nus). Les zones cultivées et jachères correspondent à 49%

⁶ <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

de la surface du bassin versant tandis que les formations naturelles (savanes arborées + arbustives) correspondent à 32%.

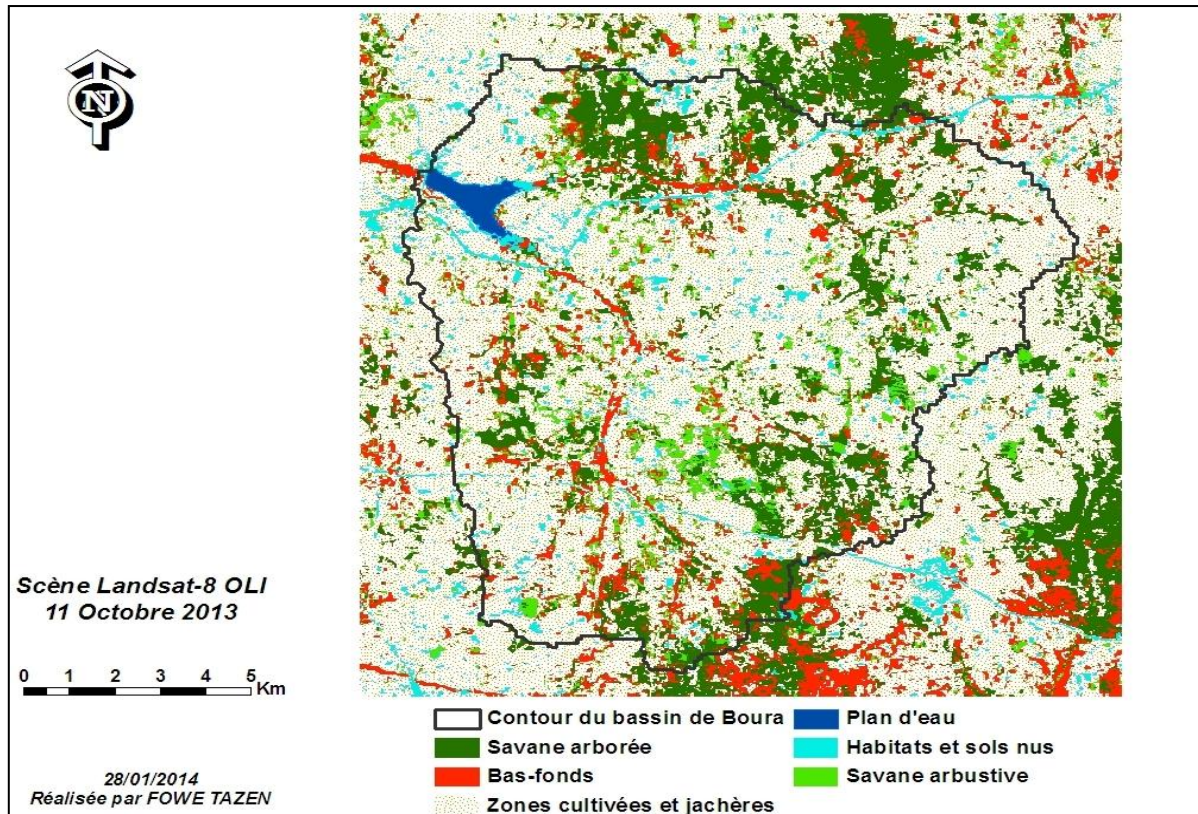


Figure 3 - 10 : Unités d'occupation du sol du bassin versant de la retenue de Boura.

3.1.3.2 Aménagements hydro-agricoles

a) Etat des ressources en eau dans la commune de Boura

Le diagnostic du secteur de l'hydraulique de la commune rurale de Boura qui compte 22 villages parmi lesquels le village de Boura révèle la création d'un certain nombre d'ouvrages hydrauliques. Ainsi, on dénombre environ 103 points d'eau fonctionnels (**Tableau 3 - 4**). Il existe également un barrage qui facilite surtout l'abreuvement des animaux et la production agricole ; et aussi la réalisation des différents travaux de construction dans la commune.

Tableau 3 - 4 : Répartition des infrastructures hydrauliques dans la commune de Boura.

Ouvrages	Forages	Forages fonctionnels	Puits modernes	Puits modernes fonctionnels	Barrages	Boulis
Nombre	80	71	68	32	1	2

Source : PNGT2, 2007

Le calcul de ratio population/point d'eau potable à l'échelle de la commune donne un point d'eau potable pour environ 250 personnes. Comparé à la norme nationale qui est d'environ un

point d'eau pour 150 personnes, on constate qu'il subsiste encore des efforts à faire en termes de réalisation de points d'eau additionnels pour couvrir les besoins en eau de la population.

b) Barrage de Boura

Le barrage de Boura a été construit en 1983 sur le site d'une ancienne retenue d'eau aménagée par les habitants de Boura dans les années 50. Cet ouvrage avait cédé dans les années 60 sous la force d'une crue « *exceptionnelle* » (information issue des entretiens avec des personnes ressources du village de Boura). Les études de réalisation du présent barrage ont été conduites pendant les années 1979 à 1981 par l'Office National des Barrages et de l'Irrigation (ONBI) devenu plus tard l'Office National des Barrages et des Aménagements Hydro-agricoles (ONBAH) sur financement de la Fédération des Eglises et Missions Évangéliques (FEME). Le barrage est bâti sur l'affluent principal rive gauche de la « Kabarvaro » qui se jette dans le Mouhoun (Volta Noire). Sa capacité et sa superficie initialement à la cote du plan d'eau normal (PEN) étaient respectivement 4,2 millions de m³ (ou 4,2 Mm³) et 200 ha (BCEOM, 1979). Le barrage est équipé d'un ouvrage de prise pour l'irrigation et d'un évacuateur de crue (déversoir + chenal d'évacuation) latéral déporté en rive droite. Les caractéristiques physiques du barrage de Boura sont présentées dans le **Tableau 3 - 5**.

La retenue de Boura est la seule source d'eau de surface permanente dans la commune de Boura. Elle était destinée à satisfaire les besoins humains, pastoraux et agricoles (ONBI, 1981), ces derniers étant les plus importants.

Tableau 3 - 5 : Paramètres techniques du barrage de Boura.

Caractéristiques de la retenue	
Cote Plan d'Eau Normal (m)	275
Cote Plus Hautes Eaux (m)	275,75
Volume à la cote Retenue Normale (m ³)	4 200 000
Capacité utile de la retenue (m ³)	3 860 000
Capacité morte de la retenue (m ³)	340 000
Surface plan d'eau (ha)	200
Hauteur utile (m)	5
Caractéristiques de la digue	
Type	Homogène en terre compactée
Cote de la crête (m)	276,25
Hauteur maximale (m)	6,25
Longueur en crête (m)	500
Largeur en crête (m)	3,50
Pente talus amont	1V / 2H
Pente talus aval	1V / 2H

Source : BCEOM, 1979

Le plan topographique de la cuvette de Boura situé dans un référentiel local avec la cote du plan d'eau normal fixée à 100 m est présenté à la **Figure 3 - 11**.

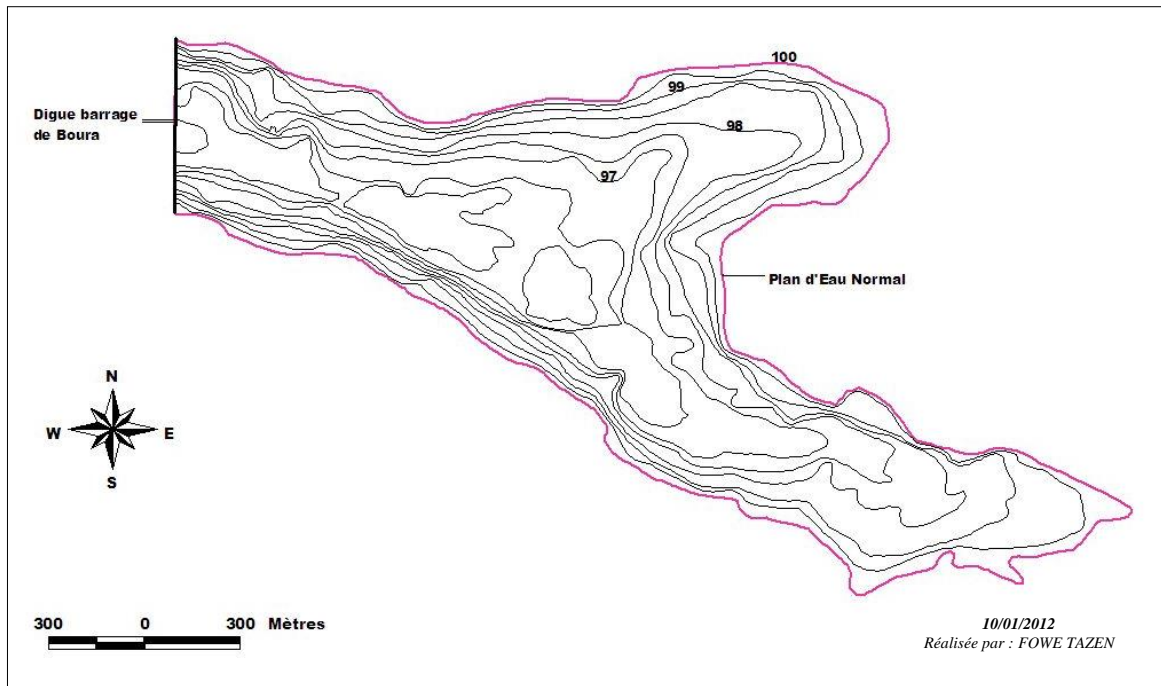


Figure 3 - 11 : Plan de la cuvette de la retenue de Boura au niveau du Plan d'Eau Normal (PEN).

Source : BCEOM, 1979

c) Les périmètres irrigués

Le réservoir de Boura permet d'alimenter plusieurs périmètres irrigués dont deux sont des aménagements formels installés par l'Etat, « CORIKAB et PIAME », et des parcelles spontanées (non aménagées) « Toumhositi ».

▪ Périmètre CORIKAB (Coopérative Rizicole Kaman NADIE de Boura)

Le périmètre collectif en aval du barrage de Boura d'environ 78 ha est plus connu sous le nom du groupement *Corikab ou de la plaine*. Les cultures pratiquées sont le riz (contre-saison et pluvial), le maïs et le maraîchage (tomate, oignon, etc.). Cet aménagement a été réalisé en plusieurs phases :

- Une première phase réalisée par l'ONBI en 1983. Cette phase a abouti à l'aménagement en 1985 d'environ 34 ha en aval soit 12 ha en rive droite et 22 ha en rive gauche. Le système d'irrigation est essentiellement gravitaire avec des canaux à ciel ouvert. Le réseau d'irrigation comprend des canaux primaires, des canaux secondaires et des canaux tertiaires ;
- Une seconde phase réalisée en 1993 par le Bureau d'Etudes et de Recherches Appliquées (BERA), qui a proposé une extension du périmètre aval d'environ 29 ha dans le prolongement du réseau de canaux existants ;

- En 2006, dans le cadre de l'intensification de la production agricole au Burkina Faso, une extension du périmètre de 15 ha en aval par le système de pompage a été réalisée. Les ouvrages de mobilisation de la ressource en eau sont des forages manuels.

Ce périmètre correspond au Type 3 de la typologie du CILSS et se situe dans la classe des périmètres moyens (MAHRH, 2003). Le **Tableau 3 - 6** regroupe quelques caractéristiques techniques de ce périmètre.

Tableau 3 - 6 : Caractéristiques techniques du périmètre aval de Boura.

	Caractéristique	Rive gauche	Rive Droite
Périmètre	superficie aménagée	41,74 ha	20,85 ha
Canal primaire Section trapézoïdale	Longueur L	4734 m	1370 m
	Largueur plafond	0,2 à 0,3 m	0,2 à 0,3 m
	Débit Transporté	8 à 192 l/s	8 à 192 l/s
	Hauteur canal, Hmax	0,50 à 0,60 m	
Canal primaire Section rectangulaire	Largueur plafond	0,30 à 0,40 m	
	Débit Transporté	8 à 24 l/s	
	Hauteur canal, Hmax	0,40 à 0,60 m	
Canal secondaire	Nombre	17	8
	Débit transporté Q	8 à 10 l/s	
	Largueur plafond B	0,30 m	
	Longueur L	4 à 232 m	
	Hauteur canal Hmax	0,20 m	
Canal arroseur Tertiaire	Longueur L	70 à 118 m	
	Débit transporté Q	8 à 16 l/s	
Digue de Protection	Hauteur canal Hmax	1,00 m	
	Largueur en crête l	2,00 m	
	Longueur total	2930 m	

Source : ONBI, 1981

- PIAME (Projet d'Intensification Agricole par la Maîtrise de l'Eau)

Le périmètre collectif en rive droite en amont du barrage plus connu sous le nom de « PIAME » a été aménagé en 2009. Ce périmètre hydro-agricole débute à environ 400 m de la digue du barrage et s'étend sur une superficie totale de 20 ha au lieu de 30 ha initialement prévue par le projet PIAME.

Le plan d'eau limitrophe au périmètre constitue un système naturel d'évacuation des eaux excédentaires. Une distance minimale de 10 m a été laissée entre la limite du périmètre et le plan d'eau à la cote des plus hautes eaux. Ce périmètre est irrigué par un système semi-

californien à deux réseaux d'irrigation distincts alimentés chacun par une station de pompage (**Figure 3 - 12**). Il correspond aux périmètres de Type 2 de la typologie du CILSS.

Chaque station de pompage abrite une motopompe centrifuge, et alimente en eau un réseau de canalisations en PolyChlorure de Vinyl (PVC) irrigation enterrées et domine une superficie aménagée de 10 ha. On y cultive principalement des cultures maraîchères et du maïs.



Station de pompage (Mars 2012)



Canal d'améné d'eau (Mars 2012)

Figure 3 - 12 : Dispositif d'exhaure au niveau du périmètre PIAME à Boura (Photos : FOWE T.).

- Toumhositi

Le périmètre non aménagé connu sous le nom du groupement Toumhositi regroupe des parcelles individuelles, installées en rive gauche du réservoir et irriguées manuellement ou à l'aide de petites motopompes, et couvre environ 10 ha, où est principalement cultivé de la tomate.

Ces périmètres autour du réservoir de Boura sont matérialisés à la **Figure 3 - 13** et la **Figure 3 - 14** présente le calendrier cultural.

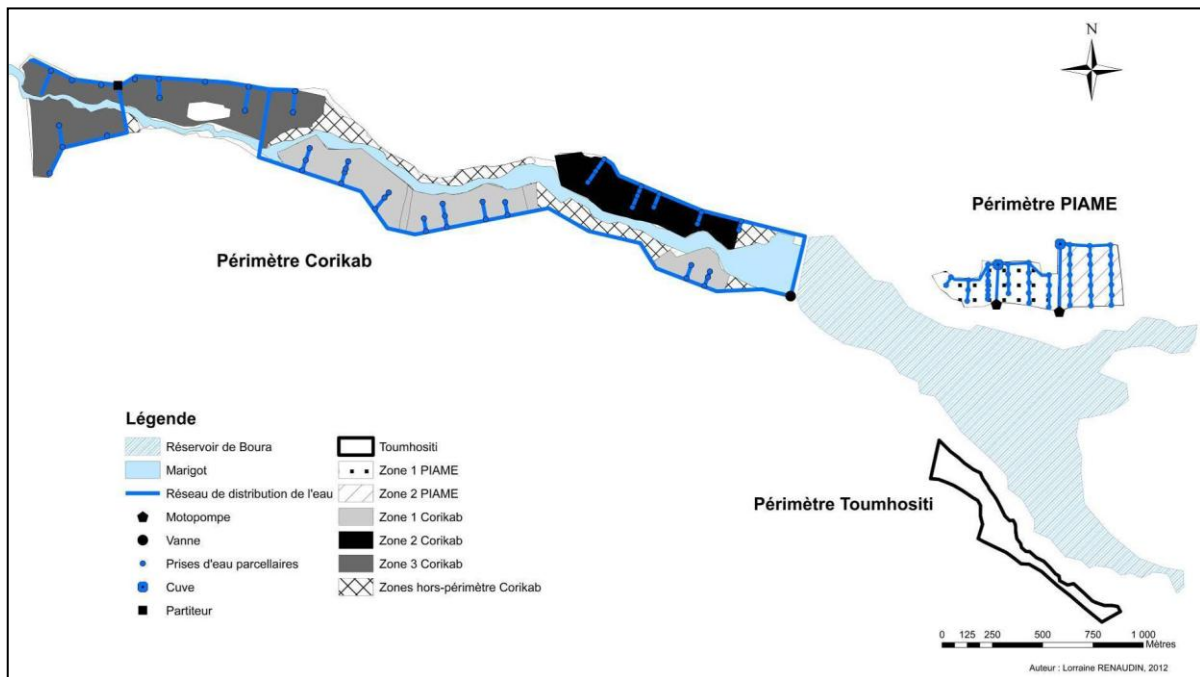


Figure 3 - 13 : Périimètres irrigués autour de la retenue d'eau de Boura et leur découpage en zones (d'après Renaudin, 2012).

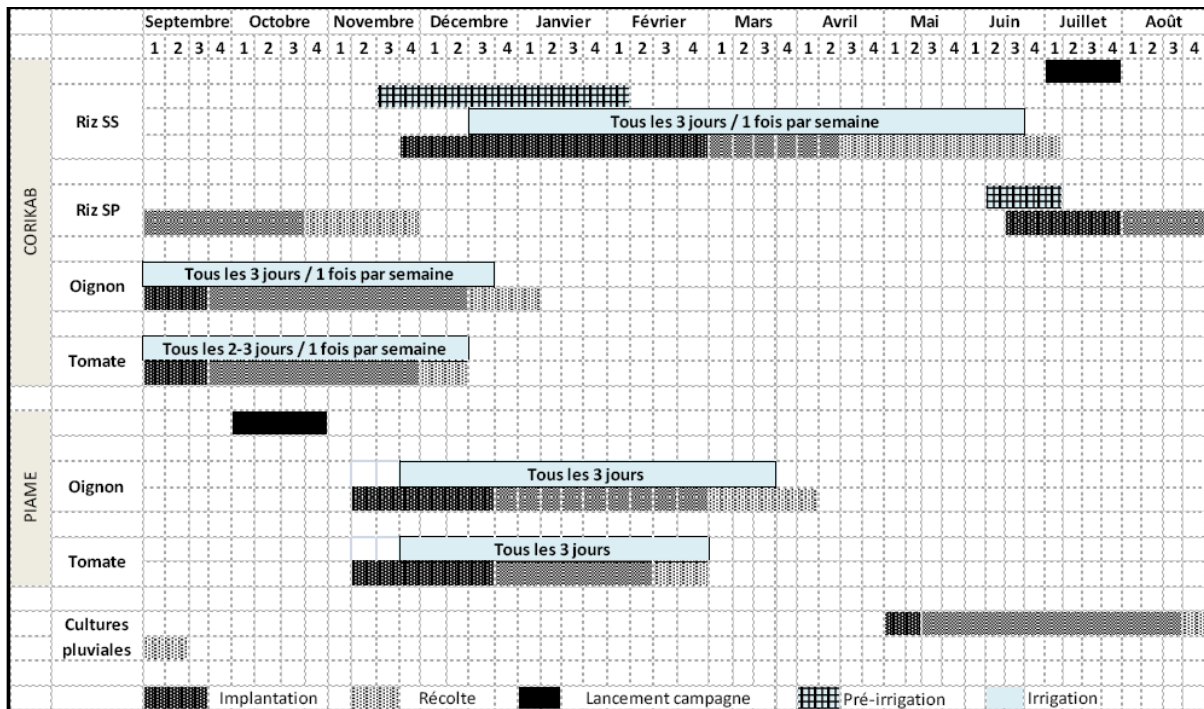


Figure 3 - 14 : Calendrier culturel au niveau des périmètres irrigués Corikab et PIAME à Boura (d'après Renaudin, 2012).

3.2 Cadre humain et socio-économique de la zone d'influence du barrage de Boura

La commune de Boura est un creuset ethnique où habitent les Sissala, les Mossi, les Peuhl et les Dagara. Malgré ces différentes ethnies, les populations vivent dans la paix et dans l'harmonie.

3.2.1 Historique du village de Boura

Le village de Boura fondé autour des années 1800 était jadis une brousse inhabitée et traversée par quelques marigots. Les occupants seraient venus d'une part, de «Boulou» au Ghana à la recherche de bonnes terres agricoles et, d'autre part, de «Tougoo» dans l'ex-Haute Volta (Burkina Faso actuel) pour fuir les éléphants qui détruisaient leurs champs. Les deux groupes d'occupants ignoraient chacun la présence de l'autre. A la recherche de l'eau, les femmes des deux groupes se rencontrèrent au bord de l'un des marigots. Surprises, elles retournèrent informer leurs maris. Ces derniers se retrouvèrent au marigot pour vérifier l'information et connaître les origines des uns et des autres. Pour connaître les premiers occupants des lieux, ils se donnèrent rendez-vous le lendemain au même endroit pour en apporter les preuves. Comme astuce, le groupe venant de « Boulou » retourna au cours de la nuit au marigot et y jeta une motte de terre tandis que celui venant de « Tougoo », y jeta une masse importante de cailloux. Le lendemain, ils se retrouvèrent tous au marigot afin de montrer les preuves. « Boulou » rentra dans le marigot en premier pour retrouver leur motte de terre mais ne la retrouva pas ayant été dissoute. « Tougoo » rentra à son tour et ressorti du marigot leur masse de cailloux. Ceci fit d'eux les premiers occupants des lieux. Ils traitèrent alors les ressortissants de Boulou de « Nébouré » en langue sissala, qui signifie en Français « Idiots ». Dès lors, les ressortissants de « Tougoo » s'emparèrent de la chefferie et fondèrent avec les ressortissants de « Boulou » le village de Boura avec les NADIE comme famille royale. De nombreux chefs se sont succédé dont l'actuel est toujours de la famille NADIE. (Compaoré, 2011; Dabiré, 2011; Renaudin, 2012; Napon, 2013).

3.2.2 Population de Boura

La population de la commune a été estimée à 29185 habitants en 2006 dont 4673 habitants pour le village de Boura (*Tableau 3 - 7*). Le taux de croissance sur la période 1996-2006 est de 3,2% par an, donc plus élevé que la moyenne nationale qui est de 2,9 % (INSD, 2008). Ce taux important souligne que Boura est une zone de forte immigration.

La composition par sexe et par âge de la population de Boura nous révèle qu'il s'agit d'une population à majorité jeune. Les enfants de 0 à 15 ans généralement considérés comme inactifs représentent 46 % de la population totale, tandis que la population active dont la

tranche d'âge varie entre 15 et 64 ans, constitue 49 %. Les femmes représentent 51%, soit une majorité légèrement féminine.

Sur le plan ethnique, la commune de Boura est peuplée à 47% des autochtones (Sissala) et 53% des allogènes (20% de Dagara, 22% de Mossi et 11% de Peulh) à la recherche de terres cultivables et de pâturages, Boura étant une zone à fortes potentialités agropastorales (PNGT2, 2007).

Tableau 3 - 7 : Période et taux de croissance de la population à Boura (PNGT2, 2007).

Année	Nombre d'habitants	Période	Taux d'accroissement (%)
1985	2185	-	-
1996	3535	1985-1996	5,6
2006	4673	1985-2006	3,2

3.2.3 Activités économiques

L'économie locale dans la zone d'étude repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage. Les autres activités telles que le commerce, la pêche, l'artisanat et l'exploitation des produits forestiers non ligneux sont secondaires. Ces activités caractéristiques de l'économie de la zone ne sont cependant pas exclusives les unes des autres, mais complémentaires dans le quotidien de plusieurs concessions.

3.2.3.1 Agriculture

L'activité agricole est très développée dans la commune de Boura. Elle occupe plus de 90% de la population active et constitue la principale source de revenus. L'activité agricole se distingue selon le mode de gestion de l'eau et le type de terre, en agriculture de hautes-terres strictement pluviale, agriculture de bas-fonds sous inondation et en culture irriguée (maraîchage et riziculture) sur le périmètre collectif ou en bordure de lac. L'agriculture est dominée par les cultures céréalières que sont le mil, le maïs et le riz. Elle est traditionnelle de type extensif, basée sur l'utilisation de matériel rudimentaire (daba, pioche, etc.). Les agriculteurs sont confrontés aux problèmes de rentabilité des terres, situation expliquée par la baisse de la fertilité des sols et le manque de moyens financiers pour se procurer des engrais de qualité et en quantité nécessaire pour amender les sols (Poussin et al., 2015).

Le maraîchage pratiqué autour du barrage de Boura concerne surtout la tomate. Les autres cultures telles que l'oignon, l'aubergine, le chou, et la pastèque sont secondaires. Ces productions, surtout conduites en contre-saison, sont exclusivement destinées à la commercialisation, procurant ainsi un revenu substantiel aux populations. Le riz et le maïs, quant à eux, sont cultivés toute l'année (saison pluvieuse comme saison sèche) et destinés

aussi bien à la commercialisation qu'à l'autoconsommation. Dans le CORIKAB, les superficies rizicoles varient entre 0,2 et 0,25 ha par producteur. Le groupement rizicole est constitué de 317 producteurs dont 117 femmes. Les rendements du riz varient entre 1,12 et 6,8 tonnes à l'hectare, avec une moyenne estimée à 3,75 tonnes à l'hectare (Poussin et al., in press).

3.2.3.2 Elevage

A Boura, chaque famille dispose d'un certain nombre d'animaux, en majorité de petits ruminants. L'élevage pratiqué de type extensif s'organise principalement autour des bovins, des caprins, des ovins, des porcins et de la volaille. Le cheptel actuel est assez important et constitue un réel potentiel pour le développement de la commune de Boura (*Tableau 3 - 8*). L'élevage participe à la formation du capital de l'exploitation agricole. Il joue un rôle de régulateur à travers l'apport de revenus, qui compensent le déficit des productions végétales. Les petits ruminants, les porcins et les volailles sont les plus consommés à Boura. Le gros bétail est souvent destiné à la vente dans les marchés du Ghana, qui semble les plus florissants. En outre les animaux constituent une épargne pour les paysans.

Les animaux sont aussi et surtout sollicités pour leur force de travail lors des travaux champêtres (labours, semis, sarclage, etc.), et pour le transport des hommes et des produits. Les excréments de ces animaux servent à l'enrichissement des sols de cultures.

L'élevage est donc multifonctionnel. Il constitue une partie de l'équipement agricole du ménage, lorsqu'il concerne le gros bétail (bovins). Cette activité participe à la lutte contre la pauvreté dans la commune de Boura.

Tableau 3 - 8 : Effectif du cheptel par espèces au niveau de la commune de Boura.

Espèces	Bovins	Ovins	Caprins	Asins	Porcins	Volaille
Total	48 504	22447	39 852	5534	5626	65767

Source : PNGT2, 2007

3.2.2.3 Pêche

La pêche est pratiquée de manière artisanale dans le réservoir de Boura. Elle se fait généralement entre décembre et juillet avec un ralentissement pendant la période des hautes eaux (août à novembre). Elle concerne exclusivement les poissons tels que les carpes, les silures et les machoirons, immédiatement commercialisés ou transformés pour le marché local. Le potentiel est important et attire des pêcheurs amateurs de Ouagadougou et de Léo. Les acteurs sont mal organisés malgré l'existence d'une association dédiée aux pêcheurs et leurs capacités techniques demeurent faibles principalement par manque d'accompagnement.

3.2.2.4 Marchés

Le marché de Boura qui se tient tous les 6 jours est un véritable centre d'attraction pour tous les villages de la commune mais aussi ceux d'autres communes. On y trouve des marchands venus des villes et petites villes de l'intérieur comme Ouagadougou, Koudougou, Dissin, Ouessa, Dano et Léo. Les marchands venus du Ghana sont nombreux les jours de marché de Boura.

Les produits échangés vont des produits de l'agriculture aux produits manufacturés en passant par les produits animaliers, les produits de cueillette, etc. Au regard de l'affluence les jours de marché, du volume très important des échanges, il n'est pas hasardeux de reconnaître que le marché de Boura est un carrefour commercial et que sa construction en matériaux durs ne fera que conforter une économie locale en plein décollage.

Conclusion partielle du chapitre 3

La forte croissance démographique observée à Boura est certes alimentée par le taux de croissance naturelle mais aussi et surtout par un courant migratoire en provenance des autres provinces du pays attiré par les activités économiques qu'offrent directement (exploitation) et indirectement (transformation, artisanat et commerce liés) le barrage et les aménagements hydro-agricoles. Les enjeux liés aux ressources en eau sont énormes. L'aménagement du barrage de Boura a permis de développer les cultures irriguées telles que le riz, ainsi que le maraîchage à travers la production de la tomate, de l'oignon et des légumes d'une part, d'autre part la présence de cet ouvrage a favorisé le développement d'autres activités connexes telles que la transformation des produits agricoles, la pêche, la transformation du poisson et l'émergence de filières commerciales. La construction du barrage de Boura contribue fondamentalement à l'amélioration des conditions de vie des populations avec les opportunités de diversification d'activités. Les petits barrages apparaissent donc comme un vecteur du changement social et un générateur de richesses en milieu rural.

La caractérisation du bassin versant du réservoir de Boura par sa morphologie (forme, relief, réseau de drainage), la nature du sol et le couvert végétal a été mise en exergue dans ce chapitre. Certains paramètres physiques évalués permettent d'avoir une idée de la réponse hydrologique du bassin aux impulsions pluviométriques. Le manque de données sur les écoulements ne permet pas de faire une caractérisation hydrologique du bassin versant en termes d'apports dans le réservoir. Ceux-ci seront estimés dans le chapitre suivant par la méthode du bilan hydrologique.

CHAPITRE 4 : BILAN HYDROLOGIQUE DU RÉSERVOIR DE BOURA



Ce chapitre présente un état des lieux de la situation actuelle de la dynamique de remplissage et de vidange du réservoir de Boura. Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'un article scientifique publié dans la revue *Agricultural Water Management* (Fowe et al., 2015) dont le titre est : « **Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso** » (cf. publications).

4.1 Importance des études de bilans hydrologiques

L'étude du bilan hydrologique d'un système permet de faire une évaluation quantitative des ressources en eau et de leur évolution sous l'influence des activités anthropiques et des pressions naturelles (évaporation). Une compréhension du bilan hydrologique est extrêmement importante pour les études du cycle hydrologique et des projets de planification des ressources en eau (Love et al., 2011). La connaissance du bilan hydrologique peut permettre aussi de prévenir les conséquences des variations artificielles des régimes des cours d'eau, des plans d'eau (artificiels ou naturels) et des eaux souterraines. L'approche du bilan hydrologique est également une méthode indirecte pour estimer une composante inconnue du cycle hydrologique d'un système à partir de ses composantes connues (Abdellaoui et al., 2002, 2009). Les inconnues de l'équation du bilan peuvent être multiples, dépendant des systèmes étudiés et des informations disponibles (Alazard, 2013).

Plusieurs études sur le comportement des vidanges de mares temporaires en milieu sahélien ont permis de comprendre les dynamiques d'infiltration (Desconnets et al., 1997; Leduc et al., 1997; Martin-Rosales & Leduc, 2003). Nicola (2006) a développé un modèle de bilan hydrique du bassin versant Atankwidi, sous-bassin versant du bassin de la Volta au nord du Ghana, pour déduire les taux de recharge de la nappe souterraine. Il trouve que ces taux de recharge varient considérablement entre les années humides et sèches.

L'outil du bilan hydrologique est utilisé pour estimer les apports sur un bassin versant non jaugé dont l'exutoire est un ouvrage hydraulique. Ces apports sont considérées comme des observations lors de la calibration des modèles hydrologiques de transformation pluie-débit sur le bassin versant (Ragab et al., 2001; Lacombe, 2007). Liebe et al. (2009) ont exploré les possibilités pratiques de l'utilisation des petits barrages comme des stations hydrométriques dans les environnements disposant de peu de données en particulier dans les pays en développement. L'établissement d'un bilan hydrologique fiable des systèmes hydrauliques devient donc un enjeu scientifique majeur dans une perspective de bonne planification et de

gestion durable des ressources en eau (Celeste & Billib, 2010; Martínez-Granados et al., 2011; Garg et al., 2012).

En général, l'étude du bilan hydrologique fait état des flux entrants, des flux sortants et des stockages dans le cycle de l'eau d'un système. Sur un intervalle de temps donné Δt , l'équation générale du bilan hydrologique d'un réservoir découle de l'application du principe de conservation des volumes d'eau encore appelé équation de continuité. Elle s'écrit sous la forme de l'équation (4.1) :

$$\Delta V = V^t - V^{t-\Delta t} = V_p^t + V_{rs}^t - V_e^t - V_i^t - V_d^t - V_u^t \quad (4.1)$$

Où

ΔV : Variation du stock d'eau dans le réservoir pendant l'intervalle de temps Δt [m^3] ;

V_p et V_{rs} : volumes entrants représentant respectivement les apports dus aux précipitations tombant directement dans le réservoir et les apports en provenance des tributaires [m^3] ;

V_e , V_i , V_d et V_u : volumes sortants du réservoir représentant respectivement le volume d'eau évaporée, les pertes par infiltration (à la hauteur du barrage et dans le fond du réservoir), le volume d'eau sortant du réservoir par déversement et le volume d'eau prélevé pour divers usages [m^3].

Dans notre étude (cas de Boura), les termes tels que : les apports par ruissellement dans le réservoir (V_{rs}), les pertes par infiltration (V_i) et par évaporation (V_e) et les volumes d'eau prélevés (V_u) au niveau du réservoir sont considérés comme des inconnues de l'équation (4.1). Il est donc question dans ce chapitre de caractériser le fonctionnement hydrologique du réservoir de Boura à travers une approche simple et rigoureuse afin d'estimer ces inconnues. De ce fait, sur la base du suivi hydrologique réalisé et des hypothèses fortes émises sur certaines périodes de l'année relatives aux apports et prélèvements, nous estimerons les composantes inconnues en fonction de celles connues par restriction de l'équation bilan du réservoir.

4.2 Matériels et méthodologie d'estimation des termes du bilan de la retenue de Boura

4.2.1 Equipement hydrométéorologique (Figure 4 - 1)

Une station hydrométéorologique a été implantée à proximité de la digue du barrage de Boura en avril 2012. Cette station est équipée d'un pluviographe à augets basculeurs, et d'un pluviomètre à seau avec une surface réceptrice de 400 cm² relevé après chaque événement pluvieux installés à 1 m du sol, d'un bac évaporatoire de type Colorado (bac Colorado-

ORSTOM). C'est un bac à fond plat peint en gris neutre, de 100 cm de côté et de 60 cm de profondeur, et partiellement enterré et rempli sur 50 cm.

Une station météorologique de type «WatchDog 2000 Series», installée en août 2013, enregistre de façon automatique plusieurs paramètres météorologiques à un pas de temps horaire (températures, humidités relatives air et sol, vitesse et direction du vent à 2 m du sol, pression atmosphérique, pluie à 2 m du sol et rayonnement global).

Le niveau d'eau dans la retenue est mesuré à l'aide d'un thalimède placé dans un puits PVC avec des crépines enregistrant chaque variation de 1 cm (saison pluvieuse) ou de 1 mm (saison sèche) toutes les 15 minutes, et aussi à partir d'une batterie d'échelles limnimétriques lues deux fois par jour (06h00 et 18h00).

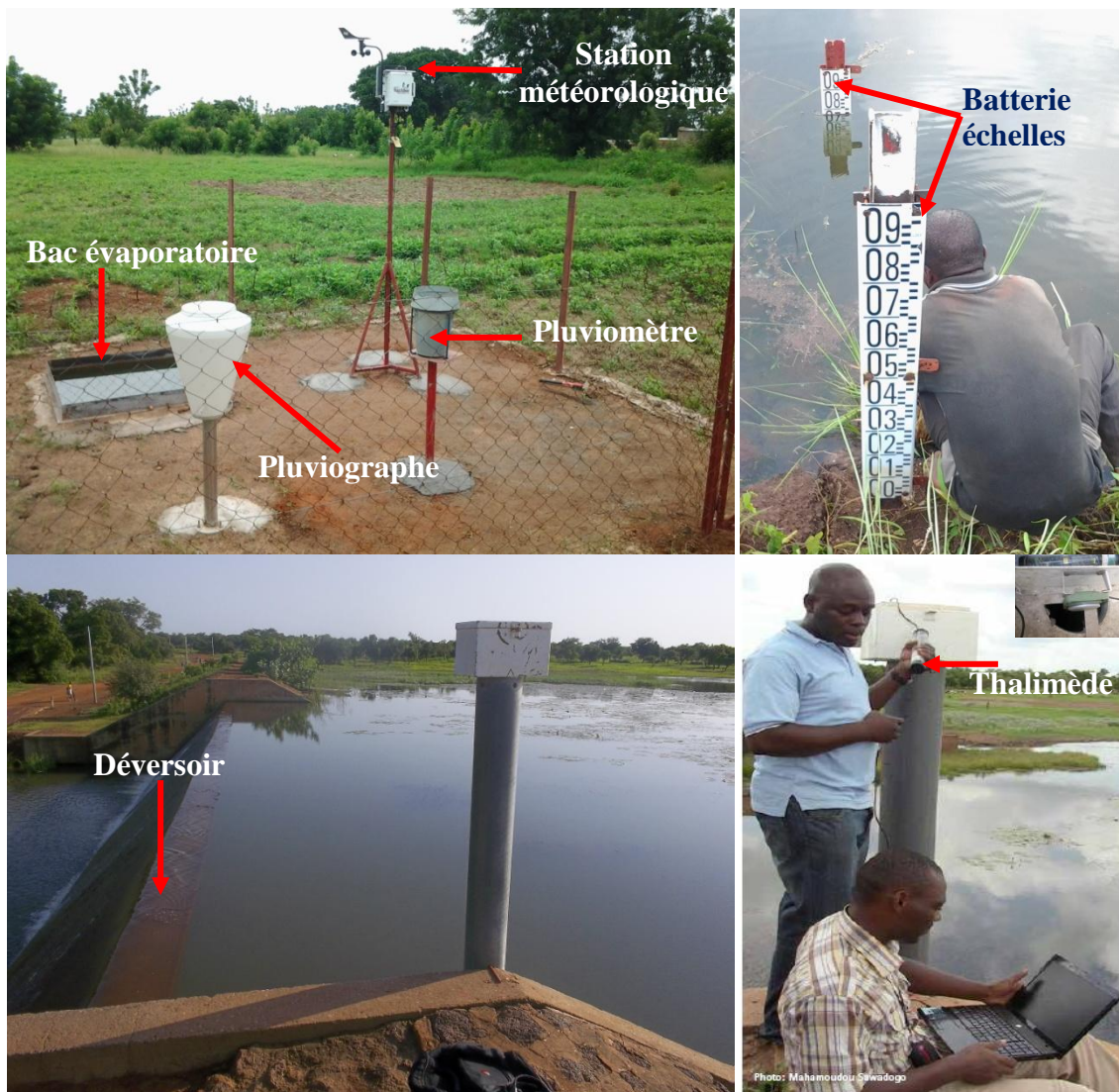


Figure 4 - 1 : Dispositif de mesure des paramètres hydrométéorologiques à Boura.

Un déversoir de forme trapézoïdale jaugé de largeur 35 m dont la cote est fixée à 100 m dans le référentiel local avec une revanche de 1,25 m permet d'estimer la charge sur ce dernier et évaluer les volumes déversés. Les prélèvements par pompages en amont et les lâchers à travers la vanne en aval du barrage ne sont pas mesurés. En revanche, des enquêtes effectuées en 2012, 2013 et 2014 ont permis de les estimer.

4.2.2 Données disponibles et incertitudes liées à leur mesure

4.2.2.1 La pluie

Pour l'analyse hydrologique, il est important de connaître les fréquences d'apparition des précipitations, leurs variabilités interannuelles ainsi que leurs distributions temporelles. Le suivi des pluies permet d'identifier les périodes sans pluie sur lesquelles on pourra estimer les flux de déstockage naturel (infiltration, prélèvements). Pour le pluviographe, les erreurs de mesure sont liées à son dysfonctionnement (panne, basculements des augets dus à des vibrations), tandis que pour le pluviomètre, les erreurs difficiles à corriger peuvent provenir des lectures de l'observateur (Dingman, 1994; Tim, 2008). D'autres erreurs peuvent être induites par l'effet du vent, par la fermeture de l'orifice par des dépôts de poussières ou de feuilles et de l'évaporation au niveau de la surface réceptrice de la pluie (Kampf & Burges, 2010). Selon Winter (1981), l'incertitude associée aux mesures de précipitations dues aux erreurs d'installation du pluviomètre varie 5 à 15%.

Dans cette étude, nous supposons que les mesures de pluie effectuées à proximité de la retenue sont représentatives de la pluie moyenne sur le bassin versant. La précision de lecture de l'éprouvette de mesure des pluies est de 0,1 mm.

4.2.2.2 Evaporation du bac (E_{bac})

La mesure directe de l'évaporation des plans d'eau n'est généralement pas possible. On est donc contraint d'utiliser des dispositifs particuliers tels que les bacs évaporatoires. La mesure de l'évaporation à Boura est effectuée chaque matin à 06h00 et chaque soir à 18h00 par remplissage du bac évaporatoire jusqu'à l'affleurement de la pointe de contrôle.

Lorsqu'il a plu entre deux mesures consécutives et que la hauteur de pluie a été supérieure à la hauteur évaporée, on enlève du bac un volume d'eau jusqu'à apparition de la pointe.

Les erreurs de mesure sur le bac sont essentiellement dues à l'observateur lors du réajustement du niveau de l'eau par rapport à la pointe dans le bac. Cependant, certaines sources d'erreurs sont indépendantes de l'observateur notamment les incidences de pluies (pertes par éclaboussures principalement dues aux turbulences du vent) et les fuites d'eau difficiles à détecter dans le cas du bac utilisé. La précision de lecture de l'évaporation avec

l'éprouvette ne peut se faire en deçà de 10 ml. Riou (1975) a montré que l'incertitude sur les mesures d'évaporation diminue lorsque l'on considère des moyennes sur des périodes plus longues. En effet, on estime à 18% l'erreur de mesure pour une évaporation journalière moyenne de 5 mm, tandis que cette erreur baisse jusqu'à 4% lorsqu'on considère les mesures décennales.

a) Comparaison de l' E_{bac} avec l'évapotranspiration de référence (ETP)

Comme présenté à la **Figure 4 - 1**, la station météorologique enregistre depuis août 2013 plusieurs variables climatiques journalières permettant de calculer l'évapotranspiration de référence journalière (ETP) à partir de l'équation (4.2) dénommée formule de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

$$ETP = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T' + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4.2)$$

ETP évapotranspiration de référence [$mm.jour^{-1}$], R_n rayonnement net à la surface [$MJ.m^{-2}.jour^{-1}$], G densité du flux de chaleur du sol [$MJ.m^{-2}.jour^{-1}$], T' température moyenne à 2 m du sol [$^{\circ}C$], u_2 vitesse du vent à 2 m du sol [$m.s^{-1}$], e_s pression de vapeur saturante [kPa], e_a pression partielle de vapeur d'eau [kPa], $e_s - e_a$ déficit de saturation de l'air [kPa], Δ pente de la courbe de la tension de vapeur saturante en fonction de la température de l'air [$kPa.^{\circ}C^{-1}$], γ constante psychrométrique (0,066 au Burkina Faso) [$kPa.^{\circ}C^{-1}$] (Ibrahim, 2012).

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27T'}{T' + 237,3}\right) \right]}{T' + 237,3^2} \quad (4.3)$$

$$T' = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

$$e_a = e^0(T_r) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T_r}{T_r + 237,3}\right) = \frac{e^0(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad (4.4)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{min}) + e^0(T_{max})}{2} \quad (4.5)$$

T_r température au point de rosée [$^{\circ}C$], HR_{max} et HR_{min} humidité relative maximale et minimale [%].

La comparaison entre les séries de données E_{bac} et ETP doit permettre de dégager un coefficient de conversion local entre ces deux grandeurs. Ce coefficient sera utilisé pour estimer les valeurs d'une de ces grandeurs en fonction des valeurs de l'autre.

b) Représentativité spatiale de la mesure d'évaporation

La mesure effectuée au niveau d'un bac évaporatoire ne représente que l'évaporation qui s'est produite dans le bac, et la transposition de la valeur de la lame d'eau évaporée à un autre système (par exemple un plan d'eau de grande taille) entraîne un biais. Ainsi, lorsque l'on veut estimer l'évaporation d'un plan d'eau de grande dimension à partir des mesures effectuées sur un bac, il est impératif de tenir compte de la différence d'échelle. Cette problématique de transfert d'échelle a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature (Riou, 1981; Pouyaud, 1990; Brunel & Bouron, 1992; Fu et al., 2004; Lowe et al., 2009). En général, un coefficient de conversion dit « *coefficient de bac* » ou « *coefficient de transposition* » est utilisé pour pallier les problèmes de transfert d'échelle et de transposition spatiale (Lowe et al., 2009).

Pour cette étude, la valeur 0,8 est attribuée au coefficient de transposition. Cette valeur se justifie par les résultats des travaux de Brunel & Bouron (1992) réalisés au sud-ouest du Burkina Faso, particulièrement dans les localités de Diebouougou et Gaoua influencées par le même climat qu'à Boura.

4.2.2.3 Suivi du barrage

a) Mesure des niveaux journaliers

Les cotes du plan d'eau sont relevées chaque matin et chaque soir au niveau de la batterie d'échelles limnimétriques. Chaque variation de 1 cm (en saison de pluie) et 1 mm (en saison sèche) du niveau du plan d'eau est enregistrée par un thalimède (codeur limnimétrique à flotteur) toutes les 15 minutes. Le niveau de référence du thalimède est ajusté à partir de la lecture sur les échelles limnimétriques situées à côté du puits du thalimède. Les mesures journalières par observation directe sur la batterie d'échelles limnimétriques permettent de corriger les dérives éventuelles du thalimède. Les chroniques des cotes du barrage de Boura peuvent être ainsi constituées à différents pas de temps : horaire, journalier, hebdomadaire et mensuel.

Les variations limnimétriques du plan d'eau ne seront connues avec une précision convenable que dans la mesure où les erreurs dues aux batillages ou tout autre mouvement d'oscillation en masse affectant la surface de l'eau, resteront minimales devant l'amplitude de la variation limnimétrique elle-même.

La précision de la mesure à l'échelle est admise comme égale au quart du seuil de discrétisation de la mesure soit 0,25 cm (Brunel & Bouron, 1992). L'incertitude sur l'évaluation d'une variation de cote est estimée à 0,5 cm. Lacombe (2007) a montré que l'incertitude de la variation moyenne de la cote des retenues collinaires et du barrage de El Haouareb en Tunisie Centrale diminue lorsque la durée de l'épisode est élevée (nombre de jours important). Elle varie de 30% pour une période de 1 jour à moins de 5% dans le cas d'une période de 30 jours. Alazard (2013) a estimé à 10% de la variation de hauteur, l'erreur liée à la mesure de la cote du barrage El Haouareb en Tunisie Centrale pour un signal lissé sur une période de 10 jours.

b) Caractéristiques morphologiques du barrage de Boura

En Afrique de l'Ouest et particulièrement au Burkina Faso, la question du comblement des retenues artificielles reste d'actualité depuis les travaux de Grésillon & Reeb (1981) et Mietton (1986). Schmengler (2011) a évalué à presque 60% les pertes des capacités mortes (zones inactives) de trois retenues d'eau sur une période de 20 ans au Sud-Ouest du Burkina Faso. Cependant, les visites de terrains effectuées à Boura n'ont pas révélé de dégradations majeures du bassin versant drainant le réservoir de Boura et par conséquent peu d'apport de sédiments. Les niveaux de sédimentation restent relativement faibles, d'autant plus que l'ouvrage de prise d'eau du barrage est toujours fonctionnel et le barrage n'a jamais été curé depuis sa construction en 1983. Par ailleurs, il n'existe pas de vannes de vidange de fond du barrage de Boura.

Au vue de ces observations, nous pouvons faire l'hypothèse que, la morphologie du réservoir de Boura n'a pas subi de profondes modifications. Ainsi, les lois volumétriques (hauteur/surface et hauteur/volume) initiales reconstituées par digitalisation du fond topographique au 1/5000^{ème} de la cuvette de Boura (**Figure 4 - 2**) restent valides et seront utilisées pour déterminer la surface du miroir du réservoir et le volume stocké à partir de la cote du niveau d'eau.

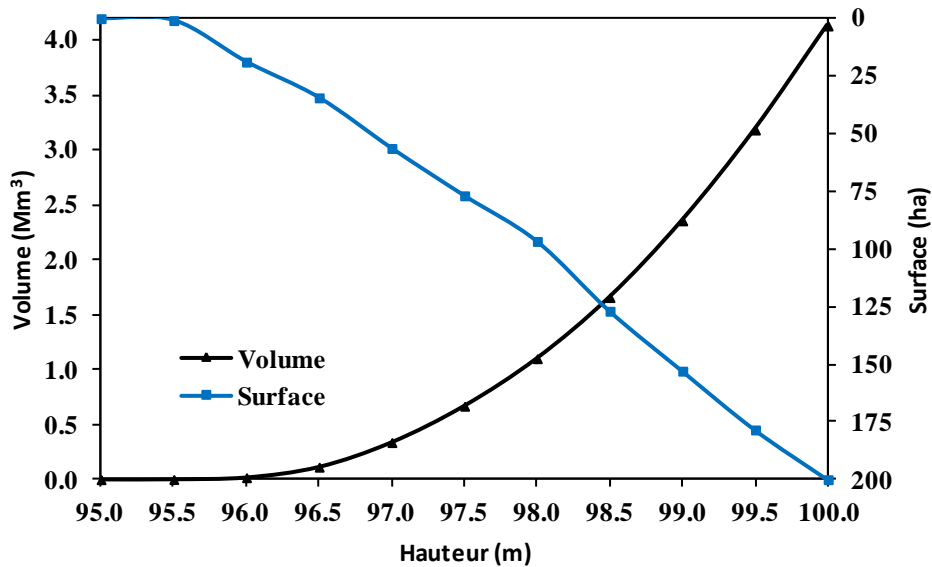


Figure 4 - 2 : Courbes hauteur/ volume et hauteur/surface du réservoir de Boura.

Pour une cote située entre deux points de mesures successives, le calcul de la surface ou du volume se fait par interpolation linéaire. Selon Lacombe (2007), cette opération peut être entachée d'erreurs provenant des incertitudes liées à la mesure de la cote et à la dégradation des courbes d'étalonnage. L'incertitude liée aux courbes peut être négligée si la morphologie de la cuvette n'est pas modifiée et aussi dans le cas de faibles variations de niveau (Alazard, 2013). Celle-ci est valable à Boura où nous supposons que la morphologie de la cuvette est inchangée et les variations de niveau peu importantes.

4.2.3 Méthodologie d'estimation des termes du bilan hydrologique

4.2.3.1 Pertes naturelles au niveau du réservoir de Boura

a) Pertes par évaporation

De nombreuses méthodes (indirectes, empiriques et analytiques) ont été développées pour estimer l'évaporation des plans d'eau libre (Allen et al., 1998; Abteu Wossenu, 2001; Rosenberry et al., 2007; Ali et al., 2008; Tanny et al., 2008). Le choix d'une méthode dépend de la disponibilité des informations nécessaires à sa mise en œuvre.

Notre étude s'intéresse aux mesures indirectes à partir des données du bac évaporatoire situé à proximité de la retenue. Pour cette méthode, il se pose alors une question de transposition des données du bac à l'évaporation des plans d'eau plus larges (Abteu Wossenu, 2001; Fu et al., 2004; Martinez Alvarez et al., 2007; Lowe et al., 2009). Comme mentionnée à la section 4.2.2.2b), l'extrapolation de la mesure à partir du bac se fait à partir d'un coefficient de correction inférieur à 1, qui dépend du type de bac et de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour 33 lacs en Afrique de l'Ouest et du Centre, des coefficients annuels de

transposition du bac Colorado à une grande retenue ont été estimés et varient entre 0,63 et 1 (Pouyaud, 1990; Brunel & Bouron, 1992; FAO, 1996).

Les pertes par évaporation dépendent des caractéristiques physiques de la retenue telles que la surface et la profondeur. Le volume évaporé pendant un intervalle de temps Δt , est estimé comme le produit du taux d'évaporation par la surface moyenne du plan d'eau pendant l'intervalle de temps considéré. Il s'exprime par l'équation (4.6) :

$$V_e^t = 10 \times A_r^t \times E_{ret}^t \quad (4.6)$$

$$E_{ret}^t = K_{bac} \times E_{bac}^t \quad (4.7)$$

Où K_{bac} est le coefficient de transposition de l'évaporation bac (E_{bac}^t) à l'évaporation de la retenue (E_{ret}^t) et A_r^t la superficie de la retenue d'eau [ha].

b) Pertes par infiltration

L'infiltration n'est pas souvent considérée dans le bilan hydrologique des réservoirs, car c'est une composante difficile à estimer (Piper et al., 1986; Güntner et al., 2004). Les infiltrations peuvent se manifester dans trois situations distinctes : au fond de la cuvette de la retenue liées à la nature des sols et du sous-sol, à travers la digue de la retenue dues à un défaut d'étanchéité et sous la digue.

Nous avons dans un premier temps, mis en évidence les interactions possibles entre la retenue de Boura et la nappe par identification des voies préférentielles (fractures ou linéaments) d'écoulement d'eau souterrain. La cartographie de ces linéaments est réalisée par traitement de la scène 195-052 des images satellitaires Landsat 4 TM du 18 Novembre 1986. La validation des linéaments identifiés a été faite par l'appréciation des positions des forages à débits importants dans la localité par rapport à ces linéaments d'une part, et d'autre part par une campagne de mesures géophysiques. Les mesures géophysiques ont aussi permis d'apprécier l'évolution de l'humidité et d'avoir plus de détails sur la lithologie autour de la retenue. Ainsi, 9 profils dont les longueurs varient entre 500 et 1200 m (P1, P2, ..., P9) ont été réalisés durant 7 jours (30 avril au 06 mai 2014) autour de la retenue (**Figure 4 - 3**). La technique de prospection géophysique mise en œuvre dans cette étude est la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). La TRE est largement appliquée en hydrogéologie en raison de la qualité des données produites (Chandra et al., 2010; Al-fares, 2011; Turner et al., 2011).

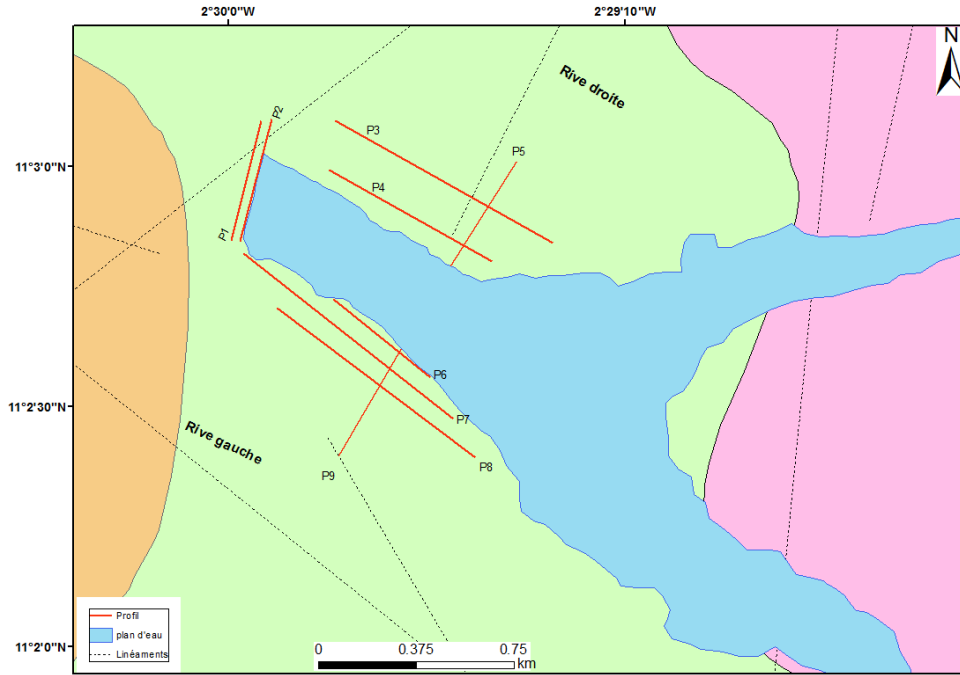


Figure 4 - 3 : Emplacement des profils géophysiques réalisés autour de la retenue de Boura (d'après Kone, 2014).

Dans un second temps, deux méthodes de quantification des flux d'échange d'eau entre le réservoir et la nappe ont été déployées à savoir : la méthode du bilan hydrologique et la méthode par modélisation numérique.

♣ *Estimation des pertes par infiltration par approche de bilan d'eau*

En dépit des techniques avancées, le bilan hydrologique demeure une approche facilement mise en œuvre pour estimer la recharge à partir des réservoirs. Dans cette approche, le volume infiltré est considéré comme terme résiduel de l'équation (4.1) sur des périodes sans apports dans le réservoir (pas de pluie, pas de ruissellement) et avec des prélèvements minimes voire négligeables (Sukhija et al., 1997; Mugabe et al., 2003; Kingumbi et al., 2004; Lacombe, 2007). Ainsi, de l'équation (4.1), on estime le volume infiltré par l'équation (4.8a) :

$$V_i^t = -\Delta V - V_e^t \quad (4.8a)$$

En remplaçant la variation de volume du réservoir (ΔV) par la variation de cote Δh , suffisamment faible pour que la variation de surface de la retenue soit négligeable, le taux d'infiltration peut être estimé par l'équation (4.8b) en supposant l'inclinaison du fond du réservoir négligeable.

$$I_f^t = -\Delta h - E_{ret}^t \quad (4.8b)$$

Où I_f^t représente le taux d'infiltration [$mm.\Delta t^{-1}$], Δh la variation de la cote par unité de temps [$mm.\Delta t^{-1}$] et E_{ret}^t le taux d'évaporation [$mm.\Delta t^{-1}$].

♣ *Estimation des pertes par infiltration à partir de la modélisation numérique*

Le processus de modélisation des échanges entre la retenue et la nappe comprend : l'élaboration d'un modèle conceptuel géologique et hydrogéologique, la transcription du modèle conceptuel en un modèle mathématique et l'implémentation d'un modèle numérique.

Dans cette étude, le modèle conceptuel est un modèle tri-couches (couche granite altéré, couche granite fissuré et couche granite sain). Ces couches ont été définies à partir de l'analyse des lithologs (coupes des forages) de la zone. Le modèle numérique des écoulements souterrains est basé sur la loi de Darcy et l'équation de continuité (Rodríguez et al., 2006). Les simulations numériques ont été faites en régime permanent et en considérant le milieu isotrope et homogène (Antonino et al., 2004). Ainsi, l'équation (4.9) exprime l'hydrodynamique souterraine.

$$\text{div}(-\overline{K}^h \bullet \overline{\text{grad}H}) = Q^r \quad (4.9)$$

Où K^h est la conductivité hydraulique du milieu [$m.s^{-1}$], H la charge hydraulique et Q^r les termes sources (différentes pertes au niveau du réservoir) [$m.s^{-1}$].

L'équation (4.9) est résolue par la méthode des différences finies avec le code Modflow sous le logiciel GMS (Groundwater Modeling System). GMS est un modèle à base physique polyvalent et largement utilisé pour la modélisation hydrogéologique 2D ou 3D. Les valeurs des mesures piézométriques du mois d'avril 2014 et de la conductivité hydraulique ont permis de calibrer le modèle.

Dans cette étude, nous supposons que les limites du bassin hydrologique se superposent avec celles du bassin hydrogéologique. Ainsi, les limites du modèle hydrogéologique qui correspondent aux lignes de crête du bassin hydrologique sont considérées comme des limites à flux nuls. C'est une condition de type Neuman homogène.

Des conditions aux limites imperméables sont appliquées à la digue du barrage. La retenue est considérée comme un lac artificiel à usage humain avec un paramètre de résistance aux échanges entre la retenue et la nappe sous-jacente. Le barrage ayant plus de 3 décennies, nous supposons un colmatage du fond de la retenue ce qui réduirait fortement les échanges verticaux. Dans Modflow, le flux d'eau échangé à la frontière réservoir-aquifère est représenté par une condition de type Fourier appliquée à la cellule concernée (Sauret, 2013).

Les drains sont matérialisés dans le bassin. Ils représentent les principaux canaux qui drainent les eaux jusqu'au réservoir. La taille des mailles choisie est de 155 m x 170 m x 40 m.

c) Déversement

Les débits déversés sont contrôlés par un déversoir rectangulaire à seuil épais. La formule de Bazin (Nouvelot, 1993), appliquée au régime dénoyé, permet d'estimer les débits déversés si les caractéristiques du déversoir et la charge en amont sont connues. Le débit est évalué par l'équation (4.10).

$$Q_{dév} = m_d \times L_d \times 2g^{\frac{1}{2}} \times h_d^{\frac{3}{2}} \quad (4.10)$$

m_d : Coefficient de débit moyen (dépend du type de déversoir) égal $0,4 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$, L_d : Longueur déversante [m], g : Accélération de la pesanteur égale $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et h_d : Charge sur le déversoir [m].

La charge sur le déversoir est obtenue par la différence entre les cotes enregistrées par le thalimède toutes les 15 minutes et la cote du déversoir. Les volumes déversés sont calculés sur des intervalles de temps de 15 minutes, puis cumulés pour avoir les volumes déversés journaliers ou mensuels.

4.2.3.2 Pertes par prélèvement pour divers usages

A Boura, aucun dispositif n'était mis en place pour estimer les volumes d'eau prélevés à diverses fins (irrigation, alimentation en eau du bétail, confection usages artisanaux et domestiques).

a) Estimation des volumes prélevés pour l'irrigation

La vanne de lâcher d'eau pour l'aménagement agricole en aval du barrage ne dispose pas d'un compteur volumétrique. Pour évaluer les quantités d'eau soutirées par la vanne, nous avons effectué des jaugeages ponctuels au flotteur et au micro-moulinet pour calculer les vitesses moyennes des écoulements dans les canaux primaires (**Figure 4 - 4a**). Nous avons aussi utilisé la formule de Manning-Strickler pour évaluer les débits connaissant les caractéristiques hydrauliques des canaux (largeur du fond du canal, pente de talus, coefficient de rugosité, etc.) et les niveaux d'eau dans les canaux.

Durant la campagne agricole 2013/2014, les canaux primaires ont été équipés d'échelles limnimétriques (**Figure 4 - 4b**). Un aiguadier (personne responsable de la gestion de la vanne) a effectué un suivi quotidien qui a consisté en la lecture des échelles dans les canaux primaires et le relevé des heures d'ouverture et de fermeture de la vanne (correspondantes au

début et à la fin du prélèvement). Les données enregistrées ont permis d'estimer la durée moyenne des prélèvements par la vanne et les volumes d'eau écoulés.

Pour estimer les volumes d'eau prélevés pour le maraîchage en amont du barrage de Boura, un questionnaire (cf. **Annexe 4.A.**) a été soumis aux maraîchers au cours de deux missions sur le terrain (04-15 novembre 2013 et 19-23 janvier 2014) (**Figure 4 - 4c**). Ce questionnaire vise à caractériser les usages de l'eau en amont du réservoir de Boura à partir d'indicateurs numériques ou qualitatifs : nombres de maraîchers, modes d'irrigation, surfaces et cultures irriguées, calendriers d'irrigation, les caractéristiques des outils d'exhaure et volumes prélevés.



Jaugeage au micro-moulinet (Mars 2013)



Jaugeage au flotteur (Mars 2013)

(a)



Canal primaire avec la vanne ouverte (Nov. 2013)



Canal primaire avec la vanne fermée (Nov. 2013)

(b)



Enquête auprès des maraîchers (Nov. 2013)



Bidons comme outils d'exhaure (Nov. 2013)

(c)

Figure 4 - 4 : (a) Techniques de jaugeages mises en œuvre à Boura, (b) Dispositif de suivi des niveaux d'eau dans les canaux primaires, (c) Entretien avec les maraîchers sur les parcelles (Photos : FOWE T.).

Le nombre de maraîchers n'étant pas connu au préalable, il n'était pas possible de définir à l'avance la taille de l'échantillon à enquêter. Sur le terrain, nous avons répertorié 42 maraîchers parmi lesquels 34 ont été enquêtés soit un pourcentage de 81%. L'âge des

exploitants enquêtés se situe entre 18 et 48 ans avec 67% d'autochtones et 33% d'allogènes (exploitants venus d'ailleurs). La grande majorité se trouve dans la tranche 30-35 ans (**Figure 4 - 5**). Ils sont donc relativement jeunes.

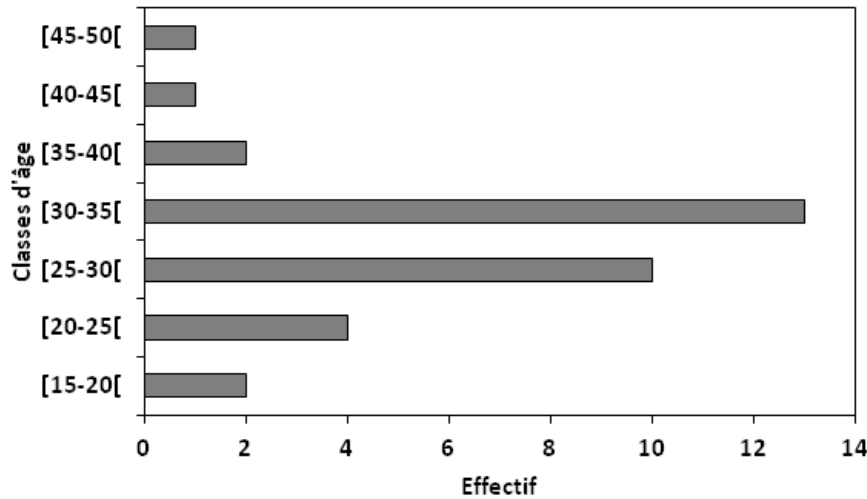


Figure 4 - 5: Effectif de l'échantillon enquêté par tranche d'âge.

b) Estimation des volumes prélevés par le cheptel

Grâce au réservoir, l'abreuvement des animaux ne constitue plus un problème pour les éleveurs. Les animaux sont conduits directement au barrage par les enfants et par les bergers quand il s'agit du gros bétail. En l'absence des données actuelles des effectifs du cheptel, nous avons utilisé les données provenant du rapport PNGT2 (2007). On suppose que 25% du cheptel de la commune s'abreuve tous les jours au niveau du réservoir.

Pour estimer les volumes consommés par le cheptel, les différents types d'animaux ont été convertis en Unités de Bétail Tropical (UBT) et les besoins en eau considérés sont de 35 l/jour/UBT. La présence des animaux au niveau du barrage est surtout observée pendant la période sèche.

c) Estimation des prélèvements à partir du bilan hydrique

Connaissant les pertes par infiltration et par évaporation, les volumes d'eau prélevés pour divers usages peuvent être déduits à partir de l'équation du bilan hydrologique de la retenue (équation 4.1) sur les périodes sans apports ni déversement. On considérera qu'il y a prélèvement lorsque l'amplitude de la décroissance du stock d'eau de la retenue sur un intervalle de temps donné Δt est supérieure à la somme des volumes d'eau infiltrés et évaporés. Ainsi, à partir de l'équation (4.1), les volumes d'eau prélevés sont estimés par l'équation (4.11) :

$$V_u^t = -\Delta V - V_e^t - V_i^t \quad (4.11)$$

Les prélèvements totaux pour les périodes complètes avril-2012/mars-2013 et avril-2013/mars-2014 ont été estimés respectivement à 0,84 Mm³ et 0,95 Mm³.

4.2.3.3 Apports

a) Apports directs par précipitation

Pendant la saison pluvieuse, la retenue reçoit directement sur sa surface des apports directs par précipitations. L'estimation des volumes précipités sur le plan d'eau pendant un intervalle de temps donné Δt nécessite la connaissance de la surface moyenne du réservoir sur l'intervalle considéré. Il s'obtient à partir de l'équation (4.12) :

$$V_p^t = 10 \times A_r^t \times P^t \quad (4.12)$$

P^t : Hauteur de la pluie [mm]

A_r^t : Superficie du réservoir d'eau [ha]

V_p^t : Apports par précipitation [m³]

b) Apports par ruissellement

Les apports ne sont pas connus. Le fait que le bassin versant du réservoir de Boura soit non jaugé contraint à estimer les apports à partir du bilan hydrologique du réservoir. Il ressort des observations de terrain et des entretiens avec le personnel des services déconcentrés de l'Etat et les autochtones de la localité de Boura que les affluents du réservoir de Boura coulent de façon continue entre fin juillet et début octobre. En supposant les prélèvements négligeables pendant cette période (les agriculteurs n'irriguent pas lorsqu'il pleut régulièrement), les apports par ruissellement sont estimés à l'aide de l'équation (4.13) :

$$V_{rs}^t = \Delta V - V_p^t + V_e^t + V_i^t + V_d^t \quad (4.13)$$

V_{rs}^t : Apports par ruissellement [m³]

ΔV : Variation du volume du réservoir [m³]

V_p^t : Volume précipité [m³]

V_e^t : Volume évaporé [m³]

V_i^t : Volume infiltré [m³]

V_d^t : Volume déversé [m³]

Les apports journaliers sont reconstitués en sommant les apports obtenus pour chaque épisode de hausse de cote survenu le même jour. Le cumul annuel de ces apports journaliers permet

d'évaluer le coefficient de ruissellement annuel du bassin versant (Oblinger et al., 2010; Ufoegbune et al., 2011) à partir de l'équation (4.14) en supposant qu'au pas de temps annuel, les hauteurs pluviométriques ponctuelles sont suffisamment homogènes pour être étendues spatialement sans l'application d'un coefficient d'abattement. Cela revient à admettre que la pluie directe sur le réservoir représente la pluie moyenne sur le bassin versant. Ainsi, aucun abattement ne sera fait sur les mesures de pluie pour l'évaluation du coefficient d'écoulement annuel.

$$V_{rs}^c = 1000 \times Kr \times P^c \times S_{bv} \quad (4.14)$$

V_{rs}^c : Volume cumulé annuel des apports journaliers du bassin versant [m^3]

P^c : Hauteur cumulée annuelle des précipitations journalières [mm]

S_{bv} : Surface du bassin versant [km^2]

Kr : Coefficient de ruissellement annuel [%]

4.2.4 Incertitudes sur les termes du bilan hydrologique

Les incertitudes sur les termes du bilan hydrologique peuvent provenir des erreurs de mesure, des approximations dans la méthode de calcul, des erreurs sur certains paramètres utilisés pour calculer certains termes et de la transposition des données régionales sur un site spécifique (Winter, 1981; Sacks et al., 1998). Les mesures des termes du bilan nécessitent une multitude d'approches, dont chacune est source d'incertitudes.

Les incertitudes relatives aux mesures des précipitations sont relevées à la section 4.2.2.1. Au regard de ces erreurs, l'intervalle de confiance attribué aux données de pluie à Boura a été estimé à 10%. Les incertitudes qui pèsent sur l'estimation de l'évaporation sont surtout dues à la transposition des données (Vallet-coulomb et al., 2001; Lowe et al., 2009). Dingman (1994) a suggéré une précision de 10 à 15% sur les données d'évaporation des plans d'eau libres avec prise en compte du coefficient de transposition et du régime climatique. Les méthodes du bilan d'énergie sont considérées comme les plus fiables avec une précision de l'ordre de 10% (Winter et al., 1995). Elsaywaf et al. (2010) ont indiqué une incertitude globale sur l'évaporation variant entre 9% et 15% selon les approches utilisées. Les mesures d'évaporation bac étant effectuées sur site, nous avons pris la limite supérieure proposée par Dingman (1994) comme incertitude sur les volumes évaporés.

Les erreurs sur les débits déversés devraient être relativement faibles, l'évacuateur de crue étant bien calibré et les variations de charge sur le déversoir connues grâce à l'enregistrement en continu des niveaux d'eau de la retenue. Winter (1981) a suggéré dans les conditions

précédentes, une erreur sur les valeurs de débit inférieure à 5%. Cette valeur maximale est considérée dans le cadre de cette étude.

Les incertitudes sur les inconnues (apports par ruissellement, infiltration et prélèvements) du bilan hydrologique, estimées à partir des restrictions de l'équation (4.1), sont quantifiées à partir des incertitudes des termes dont dépendent ces inconnues. Par exemple l'incertitude sur les pertes par infiltration dépend des incertitudes sur les variations de cote et sur les pertes par évaporation. Certaines études (LaBaugh, 1985; Lee & Swancar Amy, 1997) ont proposé une évaluation de ces incertitudes à partir des équations (4.15a) et (4.15b) :

$$\delta(X) = \left[\sum_i \delta^2(Y_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.15a)$$

$$\delta(Y_i) = \varepsilon_{Y_i} \times Y_i \quad (4.15b)$$

Où $\delta(X)$ est l'erreur absolue associée au terme résiduel X , $\delta(Y_i)$ et ε_{Y_i} sont respectivement l'erreur absolue et l'erreur relative associées à chacun des termes Y_i appartenant à l'équation bilan réduite qui permet d'estimer le terme X .

Les incertitudes évaluées à partir des équations (4.15) devraient être considérées comme des erreurs maximales probables associées aux termes résiduels. Cette approche suppose que les erreurs associées aux différentes mesures sont indépendantes les unes des autres (Lin, 2011), et par conséquent, il y a une certaine compensation des mesures qui sont trop élevées avec celles qui sont trop faibles.

4.3 Résultats et interprétation des termes du bilan hydrologique

4.3.1 Variations du niveau du réservoir

Les situations des cotes du réservoir de Boura sur la période de suivi (du 1^{er} avril 2012 au 15 novembre 2014) sont présentées à la **Figure 4 - 6**. Le régime limnimétrique du réservoir de Boura se traduit par une oscillation annuelle assez régulière dont l'amplitude est supérieure à 2 m. On observe plusieurs phases de décrue et de crue. Une décroissance polynomiale très lente des stocks d'eau est observée d'octobre à juin (phase de décrue). Sur cette période le cumul journalier des volumes évaporés, prélevés et infiltrés est supérieur aux volumes entrants (apports et précipitations) dans le réservoir. De juillet à septembre ou octobre, le niveau remonte pour la raison inverse (phase de crue). On note un fonctionnement très différent du remplissage du réservoir pour les années 2012 à 2014. Cela s'explique surtout par

la répartition temporelle pluies. En 2014, une poche de sécheresse d'une durée de 2 semaines a été observée en juillet d'où un remplissage à plusieurs pics. Ce caractère aléatoire des variables climatologiques est important dans le cadre de la gestion optimale des réservoirs à avenir incertain (Baptiste, 2013).

Pendant les 3 années de suivi (2012, 2013 et 2014), les cotes minimales du réservoir ont été observées durant la 3^e décade de juin (97,81 m le 22/06/12 et 97,47 m le 27/06/13) pour les années 2012 et 2013, et durant la 1^{ère} décade de mai (97,80 m le 05/05/14) pour l'année 2014. Ces cotes minimales correspondent à des stocks d'eau emmagasinés de l'ordre de 0,941 Mm³, 0,651 Mm³ et 0,926 Mm³ respectivement pour les saisons 2012, 2013 et 2014. Il reste des volumes d'eau importants au-dessus de la capacité morte du réservoir (0,340 Mm³). Une forte variation des niveaux du plan d'eau est observée en juillet (années 2012 et 2013) et en août 2014. Les variations journalières maximales sont de l'ordre de 42 cm et 44 cm respectivement pour les saisons 2012 et 2013, et pour la campagne 2014. Ces variations maximales observées en juillet ou en août se justifient par le début d'écoulement des cours d'eau intermittents alimentant la retenue et aussi par des événements pluvieux importants à ces dates. Les niveaux du réservoir sont fortement influencés par les caractéristiques des pluies qui contrôlent les écoulements sur le bassin.

Contrairement aux saisons 2012 et 2014, où la cote du réservoir a excédé le niveau du plan d'eau normal (100 m) pendant presque 2 mois (présence d'une charge sur le déversoir), elle n'a pas atteint ce niveau durant la saison 2013 (**Figure 4 - 6**). Le barrage n'a pas déversé (absence de charge sur le déversoir) et le volume maximum du réservoir enregistré a été de l'ordre de 3,531 Mm³. Cette situation a amené les dirigeants de la coopérative rizicole, à prendre une décision drastique relative aux superficies susceptibles d'être mises en valeur durant la contre-saison de l'année 2014 : l'une des trois zones (zone 3) du périmètre CORIKAB en aval du barrage n'a pas été exploitée. Cela explique la décrue moins importante pour cette année.

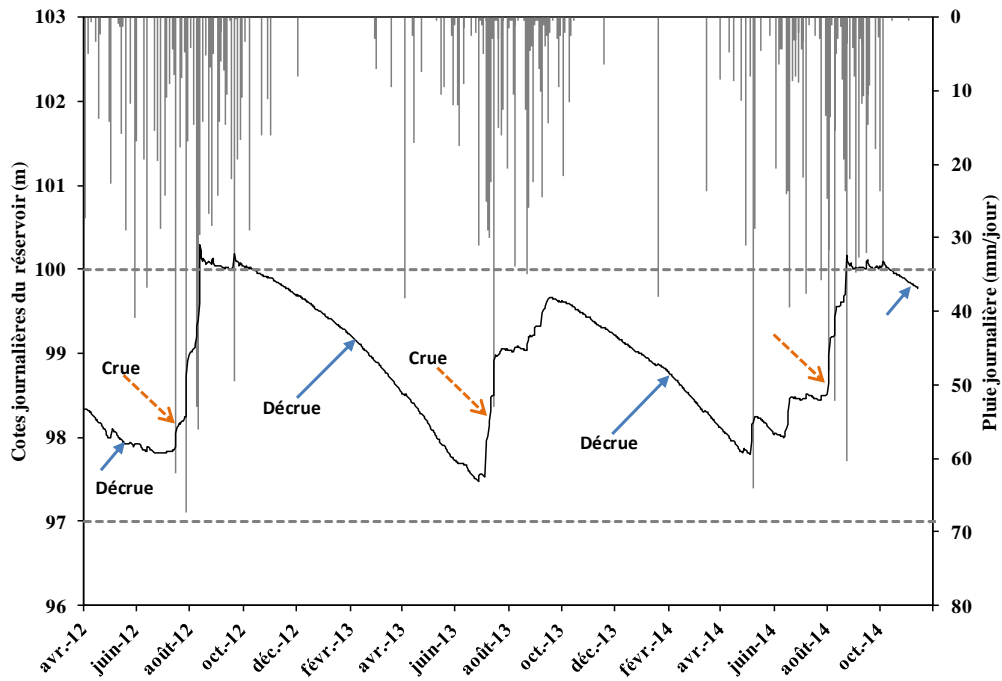


Figure 4 - 6 : Variation de l'état de remplissage du barrage de Boura sur la période du 1^{er} avril 2012 au 15 novembre 2014 (Cote du déversoir = 100 m et Cote de la prise d'eau = 97 m).

L'évolution des cotes du barrage à différentes échelles temporelles (horaire, journalière, hebdomadaire et mensuelle) est présentée à la **Figure 4 - 7**. Elle permet d'apprécier le pas de temps adéquat pour le suivi des fluctuations des niveaux d'un plan d'eau dans les pays en développement où les moyens financiers sont souvent trop limités pour acquérir des dispositifs automatiques de suivi. On observe que le limnigramme au pas de temps hebdomadaire présente un signal moins lissé comparé à celui au pas de temps journalier. Le lissage du signal est croissant lorsque le pas de temps devient de plus important. Ainsi, la perte d'information est plus prononcée à l'échelle mensuelle. Une lecture hebdomadaire ponctuelle de cotes à la même heure sur une batterie d'échelles limnimétriques permettrait de reproduire un signal acceptable des variations du plan d'eau.

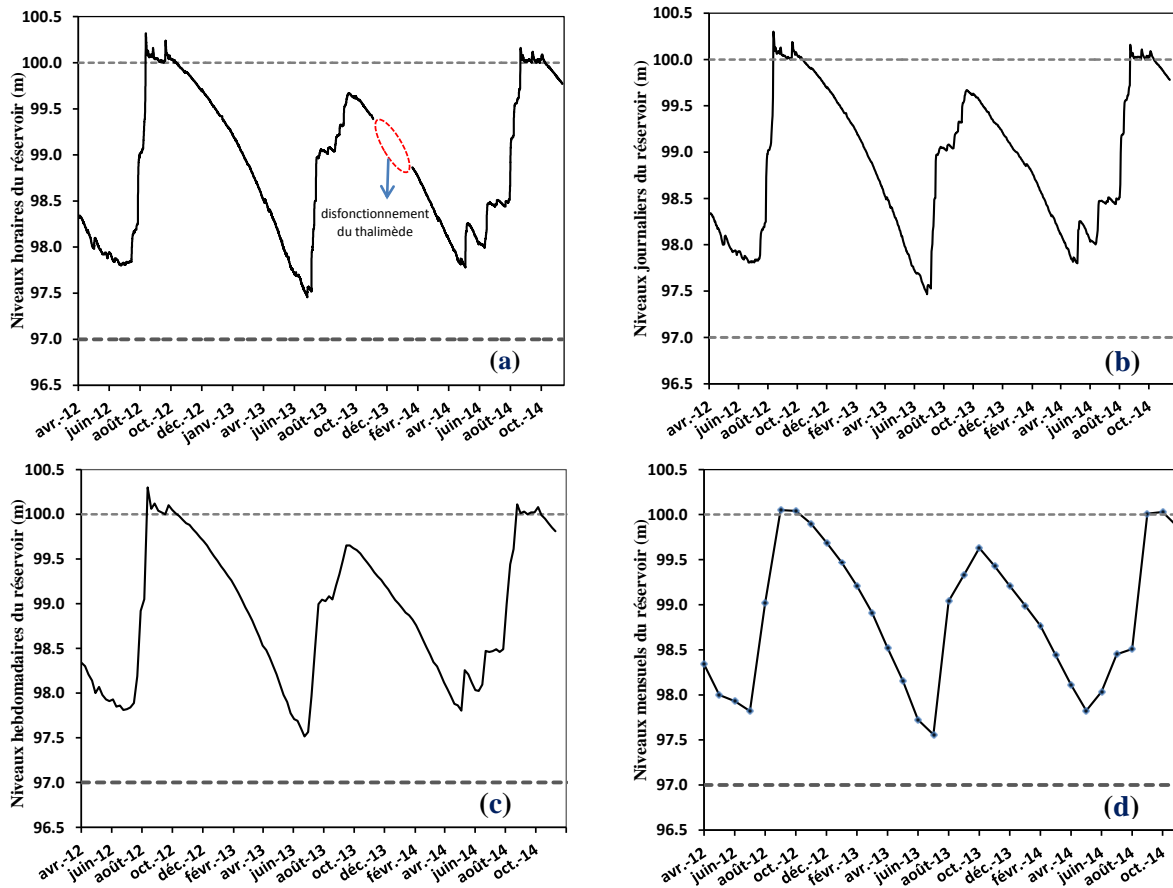


Figure 4 - 7 : Evolution des niveaux du plan d'eau du barrage de Boura à différentes échelles temporelles (a) horaire, (b) journalière, (c) hebdomadaire et (d) mensuelle sur la période du 1^{er} avril 2012 au 15 novembre 2014.

4.3.2 Analyse des précipitations et de l'évaporation

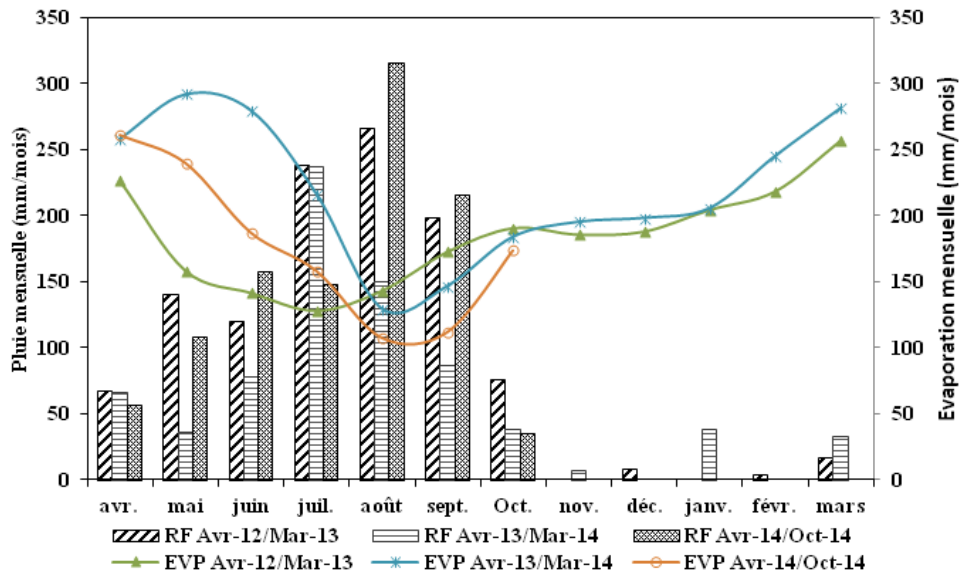
4.3.2.1 Analyse des précipitations

Pendant les saisons pluvieuses de 2012, 2013 et 2014, les cumuls de précipitations ont été respectivement de 1130 mm, 766 mm et 1032 mm. Comparés à la hauteur pluviométrique annuelle moyenne (895 mm) observée sur la période 1981–2010 à Boura, les saisons 2012 et 2014 peuvent être considérées comme excédentaires en pluviométrie et la saison 2013 déficitaire (déficit de l'ordre de -15%). Ces cumuls annuels de précipitations correspondent en termes de volume précipité directement dans la retenue de Boura à 1,639 Mm³, 1,033 Mm³ et 1,538 Mm³ respectivement pour les saisons 2012, 2013 et 2014. Les hauteurs maximales de pluies journalières de 67,3 mm, 53,0 mm et 64,0 mm ont été observées respectivement durant les saisons 2012, 2013 et 2014 (**Tableau 4 - 1**). Contrairement aux saisons 2012 et 2013 où ces pluies journalières maximales ont été observées en juillet, elles sont apparues en mai pour la saison 2014.

Tableau 4 - 1 : Caractéristiques annuelles de la pluie et de l'évaporation au niveau du réservoir de Boura.

Paramètres	Avril-12/Mars-13	Avril-13/Mars-14	Avril-14/Oct-14
Nombre de jours pluvieux	67	81	65
Pluie cumulée (mm)	1130	766	1032
Volume précipité (Mm ³)	1,64	1,03	1,54
Evaporation cumulée (mm)	1802	2105	993
Volume évaporé (Mm ³)	2,76	2,78	1,33

La distribution mensuelle des précipitations montre que juillet, août et septembre sont les mois les plus humides sur les trois années (**Figure 4 - 8**). Les cumuls de précipitations de ces mois représentent environ 65% des cumuls annuels. Ce pourcentage est inférieur à 80% annoncé par Oguntunde (2004) pour le bassin de la Volta. Pour les saisons 2012 et 2014, les pluies mensuelles maximales sont observées en août tandis qu'elle apparaît en juillet pour la saison 2013. On observe très peu ou pas de précipitations entre novembre et mars.

**Figure 4 - 8** : Distribution mensuelle des pluies (RF) et de l'évaporation bac (EVP) sur les périodes Avr-12/Mar-13, Avr-13/Mar-14 et Avr-14/Oct-14.

Les pluies journalières observées sont réparties en plusieurs classes (**Tableau 4 - 2**). Pendant la saison 2013, 60% des jours pluvieux ont une pluviosité inférieure à 5 mm caractéristique des pluies très faibles selon les classes de pluies établies par Ibrahim et al. (2012) dans l'étude du climat au Burkina Faso. Le volume du réservoir est lié non seulement à l'abondance des pluies, mais également à leur durée et aux conditions de remplissage de l'année précédente. Les faibles pluies observées ne génèrent pas d'écoulements remarquables sur le bassin versant, et par conséquent, elles ne provoquent pas de brusque variation des niveaux du réservoir. Par contre, les événements pluvieux exceptionnels (pluie > 30 mm/jour) des saisons

2012 et 2014 sont importants pour la génération des écoulements et engendrent un remplissage rapide du réservoir (fortes variations des niveaux du réservoir).

Tableau 4 - 2 : Distribution des pluies journalières pour les saisons 2012, 2013 et 2014 à Boura.

Hauteur de pluie journalière (A, mm)	Saison 2012			Saison 2013			Saison 2014		
	Nombre de jours avec Pj>A	Cumul des pluies >A (mm)	Pourcentage par rapport au cumul annuel (%)	Nombre de jours avec Pj>A	Cumul des pluies >A (mm)	Pourcentage par rapport au cumul annuel (%)	Nombre de jours avec Pj>A	Cumul des pluies >A (mm)	Pourcentage par rapport au cumul annuel (%)
50	4	238	21	1	53	7	3	176	17
40	6	329	29	1	53	7	4	224	22
30	7	366	32	6	188	26	13	533	52
20	19	683	60	15	428	55	22	746	72
10	41	1014	90	26	589	77	32	884	86
5	51	1089	96	35	663	86	41	959	93
0	67	1130	100	81	766	100	65	1032	100

Pj : Pluie journalière observée

A : Hauteur de pluie fictive

4.3.2.2 Analyse de l'évaporation

Pendant les saisons 2012 (Avr-12/Mar-13), 2013 (Avr-13/Mar-14) et 2014 (Avr-14/Oct-14), les cumuls d'évaporation au niveau du bac sont respectivement 2252 mm, 2630 mm et 1240 mm (7 mois). Pour les saisons complètes 2012 et 2013, ces cumuls sont respectivement comparables à l'évaporation moyenne annuelle (2240 mm/an sur la période 1982–2002) au niveau du bac à la station synoptique de Pô et celle obtenue (2540 mm/an sur la période 1961–1990) dans la partie ghanéenne (Upper and Northern Regions) du bassin de la Volta (Barry et al., 2005). L'évaporation a été plus intense en 2013 avec une augmentation de l'ordre de 17% comparée à la saison 2012.

En prenant en compte le coefficient de transposition, l'évaporation sur le réservoir de Boura est évaluée à 1802 mm et 2105 mm pour les saisons 2012 et 2013. Ces valeurs encadrent celle (1881 mm) de la moyenne annuelle sur 10 ans (1986–1955) proposée par Liebe (2002) dans la région supérieure Est du Ghana. En termes de volume, les lames d'eau évaporées sur le réservoir correspondent respectivement à 2,758 Mm³ et 2,775 Mm³. Malgré les lames d'eau évaporées différentes, l'écart entre les volumes évaporés est moins notable sur les deux saisons, ce qui peut être expliqué par la dépendance du volume évaporé à l'évolution de la surface du plan d'eau.

L'évolution de l'évaporation entre avril et juillet est assez différente sur les trois saisons (**Figure 4 - 8**). Pour les saisons 2012 et 2014, on observe une décroissance de l'évaporation d'avril à juillet tandis que pour la saison 2013, un pic est observé en mai. Cela peut s'expliquer par des pics de température et des vents intenses observés sur cette période. L'évaporation mensuelle minimale apparaît en juillet (saison 2012) ou en août (saisons 2013 et 2014). Il est logique que durant les mois pluvieux, le ciel ayant tendance à être plus

nuageux, les températures plus basses et l'humidité de l'air plus importante, l'évaporation soit moins intense.

Les extrêmes d'évaporation journalière au niveau du réservoir de Boura sont estimés à 1,0 mm/jour et 10,1 mm/jour sur l'ensemble de la période de suivi. Ces taux d'évaporation sont proches de ceux (2 à 10 mm/jour) proposés par Nicola (2006) pour le bassin de la Volta en Afrique de l'Ouest. En prenant en compte la surface du réservoir, les volumes évaporés varient entre 938 m³/jour et 14080 m³/jour. Les évaporations moyennes journalières mensuelles sur le réservoir de Boura varient entre 2,8 mm/jour et 7,5 mm/jour. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs extrêmes 5,2 mm/jour et 7,8 mm/jour obtenues par Pouyaud (1987) sur le lac Bam dans la zone sahélienne du Burkina Faso (situé presque à environ 250 km au nord de Boura).

Sur l'ensemble de la période de suivi, les évaporations moyennes journalières mensuelles diurnes (06 h à 18 h) varient entre 2,3 mm et 5,7 mm, tandis que celles nocturnes (18 h à 06 h) varient entre 1,2 mm et 4,2 mm sur le bac évaporatoire (**Figure 4 - 9**). Les écarts entre les évaporations moyennes journalières mensuelles diurnes et nocturnes varient entre 0,3 mm et 2,3 mm. Une différence significative est observée entre les deux séries de données (Test de Mann-Whitney au seuil de confiance de 5%). Néanmoins, l'évaporation de nuit est loin d'être négligeable comparée à celle du jour. Pour les saisons complètes 2012 et 2013, l'évaporation de nuit représente en moyenne 40% de l'évaporation annuelle.

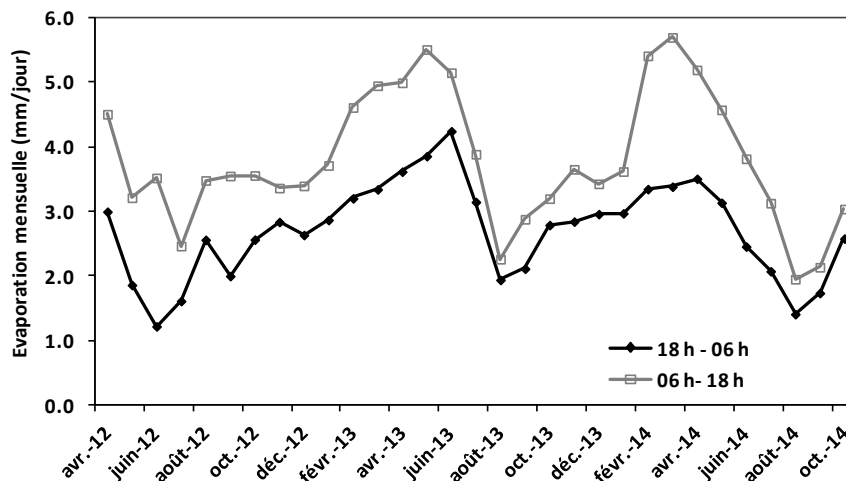


Figure 4 - 9 : Evolution des évaporations moyennes journalières mensuelles diurne (06 h – 18 h) et nocturne (18 h – 06 h) au niveau du bac évaporatoire à Boura sur la période avril 2012 à octobre 2014.

La relation entre l'évaporation du bac (E_{bac}) et l'évapotranspiration de référence (ETP) est un problème classique. Les coefficients de conversion mensuels de l'ETP à l' E_{bac} varient de 0,53 à 0,92 (**Tableau 4 - 3**), avec les valeurs maximales observées pendant la saison des pluies (juin à octobre) et les valeurs minimales observées durant la période la plus chaude (février et

mars). Un coefficient moyen annuel de conversion de 0,7 est estimé à partir des coefficients mensuels obtenus. Cette valeur est proche de celle (0,8) utilisée pour la transposition de l'évaporation bac à l'évaporation sur le réservoir.

Tableau 4 - 3 : *Evaporation bac (Ebac) et évapotranspiration de référence (ETP) mensuelles à Boura sur la période Septembre 2013 à Août 2014.*

Mois	sept.-13	oct.-13	nov.-13	déc.-13	janv.-14	févr.-14	mars-14	avr.-14	mai-14	juin-14	juil.-14	août-14
Ebac (mm)	146,6	183,9	195,2	198,2	205,6	245,3	281,5	261,3	240,1	187,3	158,4	107,8
ETP (mm)	134,5	156,8	135,1	116,1	118,4	130,1	153,5	155,7	157,0	146,3	132,0	93,8
ETP/Ebac	0,92	0,85	0,69	0,59	0,58	0,53	0,55	0,60	0,65	0,78	0,83	0,87

4.3.3 Déversement et pertes par infiltration

4.3.3.1 Déversement

Le barrage de Boura a déversé pendant les saisons 2012 et 2014 (**Figure 4 - 10**). En 2012, le débordement du barrage a duré 2 mois (du début de la 2^e décennie d'août à la fin de la 1^{ère} décennie d'octobre). La charge maximale 32 cm enregistrée sur le déversoir correspond à 43% de la charge critique (75 cm) que le barrage peut supporter en cas de crues exceptionnelles. En 2014, le barrage a déversé moins de 2 mois (du début de la 3^e décennie d'août à la fin de la 1^{ère} décennie d'octobre). La charge maximale observée est de 15 cm. Les volumes déversés journaliers maximums sont estimés à 0,752 Mm³ et 0,315 Mm³ respectivement pour les saisons 2012 et 2014.

Les maxima des cumuls mensuels des volumes déversés estimés à 3,699 Mm³ et 1,046 Mm³ sont observés respectivement en août pour la saison 2012 et en septembre pour la saison 2014. Les volumes totaux déversés ont été estimés à 6,242 Mm³ et 2,589 Mm³ respectivement en 2012 et 2014. Ces volumes correspondent à 64% et 42% des apports par ruissellement au niveau de la retenue respectivement durant les saisons 2012 et 2014. Pour ces 2 années, un renouvellement complet de l'eau du barrage pourrait être potentiellement effectué même en supposant le réservoir entièrement vide au début du remplissage (les apports étant largement supérieurs à la capacité maximale du barrage).

Par contre en 2013, aucun débordement n'a été relevé sur le seuil du déversoir. Cela est dû à la faible pluviosité enregistrée durant cette campagne. Ainsi, il n'y a pas eu de renouvellement total de l'eau du réservoir. Cette situation pourrait affecter la qualité de l'eau et avoir surtout un lien avec la prolifération des macrophytes (*Ceratophyllum submersum* L.) observée dans le réservoir (Cecchi et al., accepté). De plus, l'écosystème en aval du barrage pourrait se trouver dans des conditions de stress hydrique.

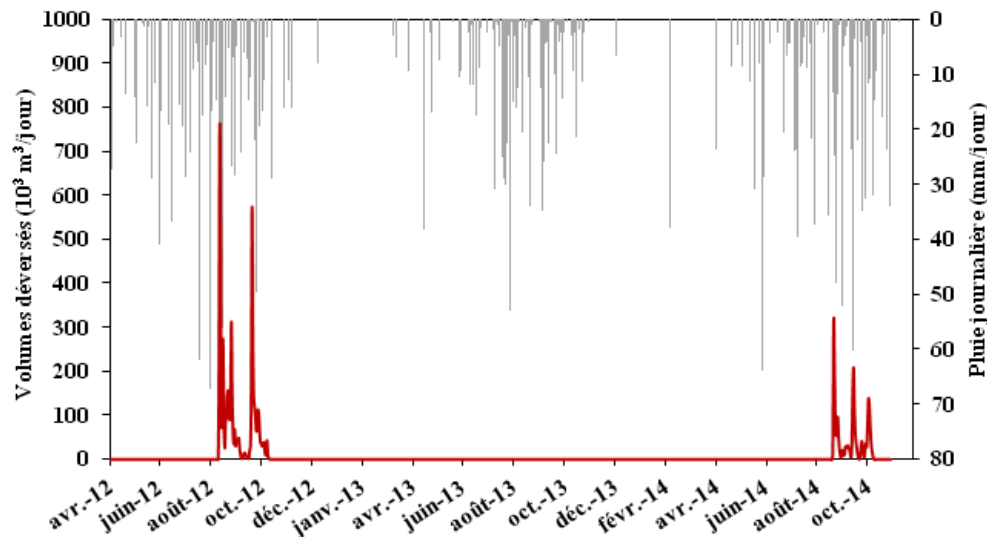


Figure 4 - 10 : Evolution des cumuls journaliers des volumes déversés à Boura sur la période Avril 2014 à Octobre 2014.

4.3.3.2 Pertes par infiltration

a) Interaction entre la retenue de Boura et la nappe souterraine

La fracturation du milieu souterrain du bassin versant du barrage de Boura a été appréciée à travers de nombreux linéaments identifiés lors des différents traitements des images satellitaires (cf. **Annexe 4.B.**). Certaines fractures présentes sur la carte photo-géologique du degré carré de Léo (chef lieu de la province de Sissili) n'ont pas été repérées à l'issue du traitement des images satellitaires. Cette situation peut être due à une mauvaise discrimination des structures linéaires supposées être des fractures souterraines ou à une faible résolution spatiale des images satellitaires.

La prospection géophysique par la méthode TRE a été pratique et très efficace dans la validation des linéaments. Elle a permis de confirmer certaines fractures et d'en mettre en exergue d'autres. La **Figure 4 - 11** montre que la majorité des forages identifiés dans la zone d'étude sont positionnés sur ces linéaments ou à proximité de ceux-ci. La méthode TRE a également permis de relever des zones très conductrices (faibles résistivités électriques) en aval de la digue et au niveau des rives du réservoir de Boura (cf. **Annexe 4.C.**). Les zones très conductrices, probablement des sables humides ou fractures, observées des profils P1 et P2 sont potentiellement des couloirs de circulation de l'eau du barrage vers la mare permanente située à quelques mètres en aval de la digue. De plus, la succession lithologique observée autour du réservoir de Boura pourrait conduire à des fuites latérales à travers les formations géologiques.

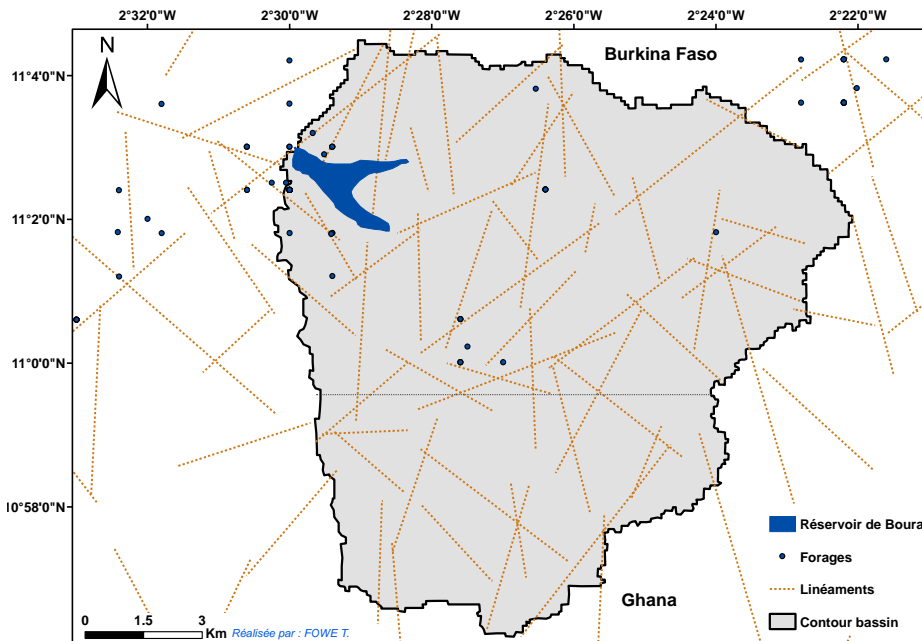


Figure 4 - 11 : Positions de quelques ouvrages hydrauliques (forages et puits du côté burkinabè) par rapport aux linéaments identifiés sur le bassin versant du barrage de Boura. Il n'y a pas eu de prospection terrain (forage et puits) sur la partie ghanéenne du bassin.

Les mesures piézométriques effectuées lors des visites de terrain de janvier et d'avril 2014 ont montré une baisse de plus de 1 m en quatre mois des niveaux statiques des ouvrages hydrauliques autour du réservoir de Boura. Cette variation est similaire à celle enregistrée sur la même période au niveau du réservoir de Boura de 1,15 m. Cette similarité des fluctuations du niveau d'eau dans le réservoir et dans les forages, permet d'envisager aussi l'existence d'une interaction entre la retenue et la nappe sous-jacente. Kone (2014) a montré que la charge hydraulique en avril au niveau du réservoir de Boura est plus élevée que celle dans les forages. Par conséquent, l'eau va du barrage vers la nappe.

b) Volumes infiltrés

La construction des petits réservoirs est une stratégie de mobilisation des eaux de ruissellement en période d'abondance. Ces réservoirs sont favorables à la recharge des nappes phréatiques. Le suivi hydrologique a permis de constater que l'eau du réservoir est moins sollicitée pour les usages agricoles en début de la période sèche (novembre et décembre). Cette période indiquée pour la détermination des taux d'infiltration du réservoir, coïncide avec la mise en place des cultures maraîchères. L'application de l'équation (4.8b) de la section 4.2.3.1 sur cette période a permis d'obtenir des taux d'infiltration variant entre 0,1 mm/jour et 4,9 mm/jour avec une moyenne estimée à 2,1 mm/jour. Cette valeur se situe dans la gamme des taux d'infiltration de 2 mm/jour à 5 mm/jour proposée par Haas (2010), pour des micro-barrages dans la localité de Léo située à 45 km de Boura.

La prise en compte des différentes hypothèses et conditions aux limites émises à la section 4.2.3.1.b a permis de simuler les flux échangés entre la retenue et la nappe. Ainsi, le bilan du modèle souterrain indique les pertes d'eau du réservoir vers la nappe estimées à environ 2620 m³/ jour en avril 2014. La surface moyenne du réservoir estimée à 94,98 ha en avril 2014, permet d'évaluer le taux d'infiltration moyen de ce mois à 2,8 mm/jour. Cette valeur se situe dans la gamme de variation du taux d'infiltration (0,1 à 4,9 mm/jour) issue de la méthode du bilan hydrologique.

En supposant le taux d'infiltration moyen 2,1 mm/jour du réservoir constant pour tous les mois, les cumuls annuels des volumes infiltrés sur les périodes Avr-12/Mar-13 et Avr-13/Mar-14 sont estimés respectivement à 1,165 Mm³ et 1,062 Mm³. Pour la période Avr-14/Oct-14, le volume total infiltré est estimé à 0,651 Mm³. On peut conclure que le réservoir contribue de façon significative à la recharge de la nappe.

4.3.4 Prélèvements au niveau du réservoir

♣ *Volumes prélevés pour le périmètre en aval*

En période sèche, le périmètre en aval du barrage est mis en valeur avec une prédominance en culture du riz. Durant les campagnes 2012/2013 et 2013/2014, les surfaces mises en valeur ont été estimées respectivement à 68,7 ha et 49,3 ha pour le riz, à 7,4 ha et 3,4 ha pour le maïs, à 1 ha et 4 ha pour les cultures maraîchères. La forte baisse des surfaces rizicoles de la saison 2013/2014 est due au faible stock d'eau disponible en début de la contre-saison dans le réservoir de Boura et à la décision du bureau du CORIKAB à restreindre les superficies susceptibles d'être mises en valeur.

Pour satisfaire les besoins en eau de ces cultures, des volumes d'eau sont prélevés du réservoir à travers la vanne. Le suivi de l'ouverture de la vanne pendant la campagne 2013/2014 a montré que la vanne n'est pas ouverte tous les jours. Sur la période sèche (novembre 2013 à juin 2014), la vanne a été ouverte pendant 110 jours avec une durée moyenne journalière d'ouverture estimée à 9 h/jour. Par contre, elle a été ouverte juste 3 jours pendant la campagne pluviale (juillet 2014 à octobre 2014). Les jaugeages effectués et le suivi des hauteurs d'eau dans les canaux ont permis d'estimer les débits moyens des écoulements à 575,8 m³/h et 234,2 m³/h respectivement pour les canaux longitudinal (distribue les zone 1 et 3) et transversal (distribue la zone 2). Ainsi, le volume total libéré durant la campagne 2013/2014 est évalué à 0,80 Mm³.

♣ *Volumes prélevés pour le maraîchage en amont du barrage*

La tomate est la principale culture observée sur le terrain. Les cultures secondaires sont le gombo, le chou et la courgette. Durant la campagne 2013/2014, les superficies individuelles ou par groupement emblavées en amont du barrage varient entre 234 m² et 13 822 m² avec un total de l'ordre de 13,5 ha. On observe un doublement de la surface cultivée comparée à la campagne précédente 2012/2013 (6,4 ha). Cette augmentation est justifiée par l'acquisition de motopompes de façon individuelle ou collective par les agriculteurs pour faciliter l'irrigation. Le calendrier agricole s'étale sur 5 mois (novembre à mars) avec la mise en place des pépinières en octobre. L'irrigation se fait aux moyens de bidons dont la capacité fluctue entre 14 et 18 l (utilisés par 67% des maraîchers), et des motopompes dont les débits maximums varient entre 10 et 18 l/s (utilisées par 33% des maraîchers). Les débits mesurés pendant les enquêtes se situent entre 4 et 9 l/s avec une durée moyenne d'irrigation de 2 h par jour. La fréquence d'irrigation est une fois tous les 3 jours pour ceux qui utilisent les motopompes et tous les jours pour ceux qui utilisent les bidons. Le nombre de bidons d'eau augmente au cours de la phase de développement des cultures.

Le cumul des volumes prélevés pour le maraîchage durant la saison 2013/2014 est estimé à 119 960 m³. Ce volume représente environ 15% du volume total libéré pour le périmètre en aval. En rapportant cela à l'hectare, on obtient en moyenne 8 886 m³/ha. Selon Dupriez and De Leener (1987), les besoins en eau pour les cultures maraîchères telle que la tomate dans les jardins en Afrique tropicale varient entre 7 000 et 7 500 m³/ha. Ainsi, l'efficacité moyenne du système peut être estimée à 80%.

♣ *Volumes prélevés par le cheptel*

L'évolution du cheptel dans la commune de Boura est présentée dans le **Tableau 4 - 4**. Le cheptel projeté en 2013 est estimé à 12 500 UBT dont 25% sont supposées s'abreuver tous les jours au niveau du réservoir de Boura. Cette consommation journalière correspond à 110 m³. En supposant que les animaux fréquentent le barrage sur la période de janvier à juin (06 mois) soit 180 jours, la consommation pastorale totale maximale est estimée à 19 750 m³ par saison sèche. Ce volume est négligeable comparé au volume libéré par la vanne pour satisfaire les demandes agricoles. Il peut avoir un biais sur ce volume dû à la non prise en considération des (très nombreux) troupeaux transhumants qui exploitent la retenue en saison sèche (seul point d'eau permanent de la province).

Tableau 4 - 4 : Types de bétail et Unités de Bétail Tropical associées (UBT)

Types	UBT	2007		2013	
		Nombre d'animaux	UBT total	Nombre d'animaux	UBT total
Bœufs	0,7	12126	8488	13980	9786
Moutons	0,1	5612	561	6470	647
Chèvres	0,1	9963	996	11486	1149
Ânes	0,4	1383	553	1594	637
Porcs	0,2	1406	281	1621	324
Total	-	-	10880		12543

Source : Adaptée de PGNT2 (2007)

Projection 2013 : taux de croissance 2,4/an (FAO, 2005)

4.3.5 Volumes ruisselés sur le bassin amont du réservoir de Boura

La contribution du bassin versant aux volumes stockés du réservoir provient des apports des cours d'eau en amont du réservoir et du ruissellement au niveau des berges. Les apports en amont du réservoir sont intermittents, avec une absence d'écoulement entre novembre et juin. Pendant les saisons 2012, 2013 et 2014, les écoulements continus des cours d'eau en amont du réservoir ont été observés respectivement durant la 2^e décennie, la 1^{ère} décennie et la 3^e décennie du mois d'août. Les apports mensuels s'obtiennent à partir des cumuls des apports journaliers.

La **Figure 4 - 12** montre l'hydrogramme moyen mensuel sur le bassin versant de Boura pour les trois années sur la période commune d'avril à octobre. On observe que, les débits maximums moyens mensuels estimés à 2,1 m³/s, 0,6 m³/s et 1,3 m³/s sont atteints en août 2012, juillet 2013 et août 2014. Les apparitions des pics de crues correspondent aux précipitations mensuelles maximales. Les écoulements par ruissellement des berges sont peu abondants entre avril et juin pour les saisons 2012 et 2013, et en juillet pour la saison 2014.

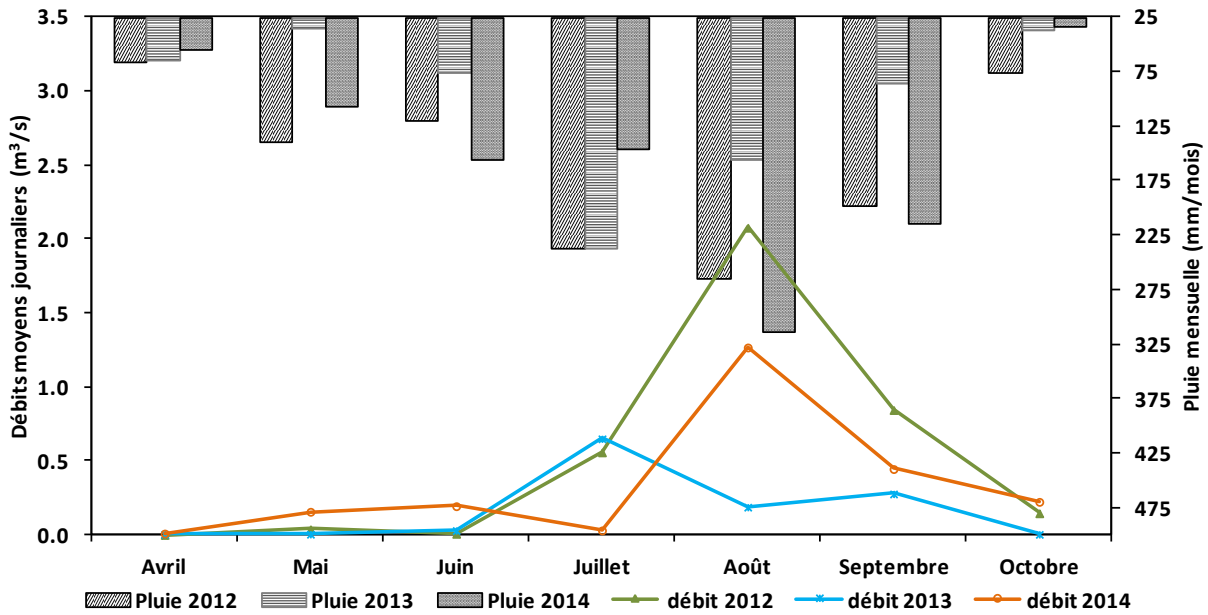


Figure 4 - 12 : Evolution des débits moyens mensuels du bassin versant du barrage de Boura pour les années 2012, 2013 et 2014 sur la période d'avril à octobre.

Les lames écoulées sur le bassin versant du barrage de Boura pendant les saisons 2012, 2013 et 2014 sont respectivement 65,1 mm, 20,5 mm et 41,2 mm, et correspondent à 9,703 Mm^3 , 3,102 Mm^3 et 6,153 Mm^3 en termes de volume. Une fraction ou la totalité (en cas de non déversement) de ces apports est stockée dans le réservoir. Ainsi, 36%, 100% et 58% des apports entrants dans le réservoir de Boura respectivement pendant les saisons 2012, 2013 et 2014 ont été mobilisés (**Tableau 4 - 5**). La saison 2013 a été très déficitaire en termes de remplissage du réservoir comparée aux saisons 2012 et 2014.

On constate que les apports par ruissellement sont très sensibles aux variations des précipitations. Par exemple une baisse de 6% des précipitations en 2014 par rapport à 2012, malgré une faible augmentation de l'évaporation (inférieure à 5%), conduit à une diminution des écoulements de l'ordre de 37%. De même, une baisse de 37% des précipitations en 2013 par rapport à 2012, malgré une hausse considérable de l'évaporation (supérieure à 25%) conduit à une diminution des écoulements de l'ordre de 68%. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Séguis et al. (2011) dans le bassin de la Donga au Bénin.

Les coefficients d'écoulement annuel du bassin de Boura varient entre 3% et 6%. Ces coefficients relativement faibles pourraient être dus à la présence d'un couvert végétal peu dégradé et l'existence de très faibles pentes (inférieures à 3 ‰) sur le bassin. Il y a aussi la présence des sols ferrugineux lessivés sur matériaux sableux ou argilo-sableux. Ces sols profonds ont une capacité de rétention en eau moyenne à bonne, ce qui pourrait aussi expliquer les faibles écoulements (cf. chapitre 3). Ces coefficients sont comparables à celui de

7% proposé par Milville (1991) pour les petits bassins versants situés à 75 km à l'est de Ouagadougou au Burkina Faso.

Tableau 4 - 5 : Paramètres hydroclimatiques au niveau du réservoir de Boura sur une période commune aux saisons 2012, 2013 et 2014.

Paramètres	Avr-12/Oct-12	Avr-13/Oct-13	Avr-14/Oct-14	Moyenne
Hauteur de pluie (mm)	1103	696	1032	943
Lame évaporée (mm)	950	1205	993	1049
Apports par ruissellement (mm)	65	21	41	42
Fraction d'apports stockés (%)	36,4	100	58,1	64,8
Coefficient de ruissellement (%)	5,9	2,9	3,9	4,2

4.3.6 Récapitulatif des termes du bilan hydrologique et incertitudes associées

Sur la base annuelle, les termes du bilan hydrologique du réservoir de Boura sur les périodes avril-12/mars-13 et avril-13/mars-14 sont regroupés dans le **Tableau 4 - 6**. La variation annuelle positive du volume du réservoir (+0,227 Mm³) pendant la campagne 2012/2013 peut signifier une faible pression anthropique sur les volumes d'eau disponibles (les volumes entrants sont supérieurs aux volumes sortants du réservoir). Pendant la campagne 2013/2014, une variation annuelle négative du volume du réservoir (-0,460 Mm³) est observée (les volumes entrants sont inférieurs aux volumes sortants).

Les erreurs moyennes estimées sur les deux périodes pour les composantes telles l'infiltration, les apports par ruissellement et les prélèvements sont respectivement de l'ordre de ±35%, ±10% et ±40%.

Les apports directs par précipitation dans le réservoir sont relativement faibles comparés aux apports par ruissellement. En effet, pour les saisons 2012/2013 et 2013/2014, les volumes précipités représentent respectivement 17% et 33% des apports par ruissellement, tandis qu'ils représentent environ 40 à 60% des volumes évaporés. Comme mentionné par Liebe (2002), l'évaporation est le facteur prépondérant dans la diminution des stocks d'eau des réservoirs. Elle représente presque 60% des pertes d'eau du réservoir de Boura. L'évaporation présente une faible variation interannuelle, surtout au regard des lames précipitées ou ruisselées sur le bassin versant. Sur les deux campagnes 2012/2013 et 2013/2014 moins de 25% des stocks d'eau mobilisés dans le réservoir sont prélevés pour satisfaire les demandes en eau des usagers. Les petits réservoirs jouent un rôle important dans la recharge des nappes souterraines. Ainsi, plus de 20% des pertes d'eau du réservoir rechargent la nappe phréatique. Ces volumes infiltrés du réservoir ne peuvent être considérés comme une ressource définitivement perdue avec la présence de nombreux forages et puits autour de la retenue. De même que l'infiltration, les volumes déversés ne sont pas vraiment considérés comme des

perdes d'eau au niveau du réservoir. Ces volumes d'eau protègent et maintiennent l'état écologique en aval de la retenue. La proportion des volumes déversés par rapport aux cumuls annuels des écoulements varie considérablement d'une année sur l'autre (64% en 2012, 0% en 2013 et 42% en 2014).

Tableau 4 - 6 : Récapitulatif des composantes du bilan hydrologique du réservoir de Boura sur les périodes avril-12/mars-13 et avril-13/mars-14.

Termes du bilan (10^6 m^3)	avril-12/mars-13	avril-13/mars-14
Apports par ruissellement	9,703 ± 0,970	3,102 ± 0,310
Apports par précipitation	1,639 ± 0,164	1,033 ± 0,103
<i>Volume entrant annuel</i>	11,342 ± 0,984	4,135 ± 0,327
Pertes par évaporation	2,758 ± 0,414	2,775 ± 0,416
Déversement	6,242 ± 0,312	0,000 ± 0,000
Pertes par infiltration	1,165 ± 0,414	1,062 ± 0,371
Prélèvements	0,841 ± 0,342	0,952 ± 0,383
<i>Volume sortant annuel</i>	11,022 ± 0,785	4,789 ± 0,676
Volume initial du réservoir	1,468	1,695
Volume final du réservoir	1,695	1,235
<i>Variation annuelle du volume du réservoir</i>	0,227	- 0,460

Toutes les composantes du bilan hydrologique du réservoir de Boura ne sont pas estimées indépendamment les unes des autres. Il est donc difficile d'évaluer la fermeture exacte du bilan. Néanmoins, on peut observer que les bilans réalisés sur les 2 années se ferment dans les marges erreurs associées aux volumes entrant et sortant.

Les **Figure 4 - 13a** et **Figure 4 - 13b** montrent le bilan hydrologique mensuel du réservoir de Boura pour les campagnes 2012/2013 et 2013/2014. La saisonnalité des apports est extrêmement marquée. On observe également que, les premières pluies produisent très peu de ruissellement sur les berges du réservoir. Cela est probablement dû aux faibles taux d'humidité des sols après la longue période sèche.

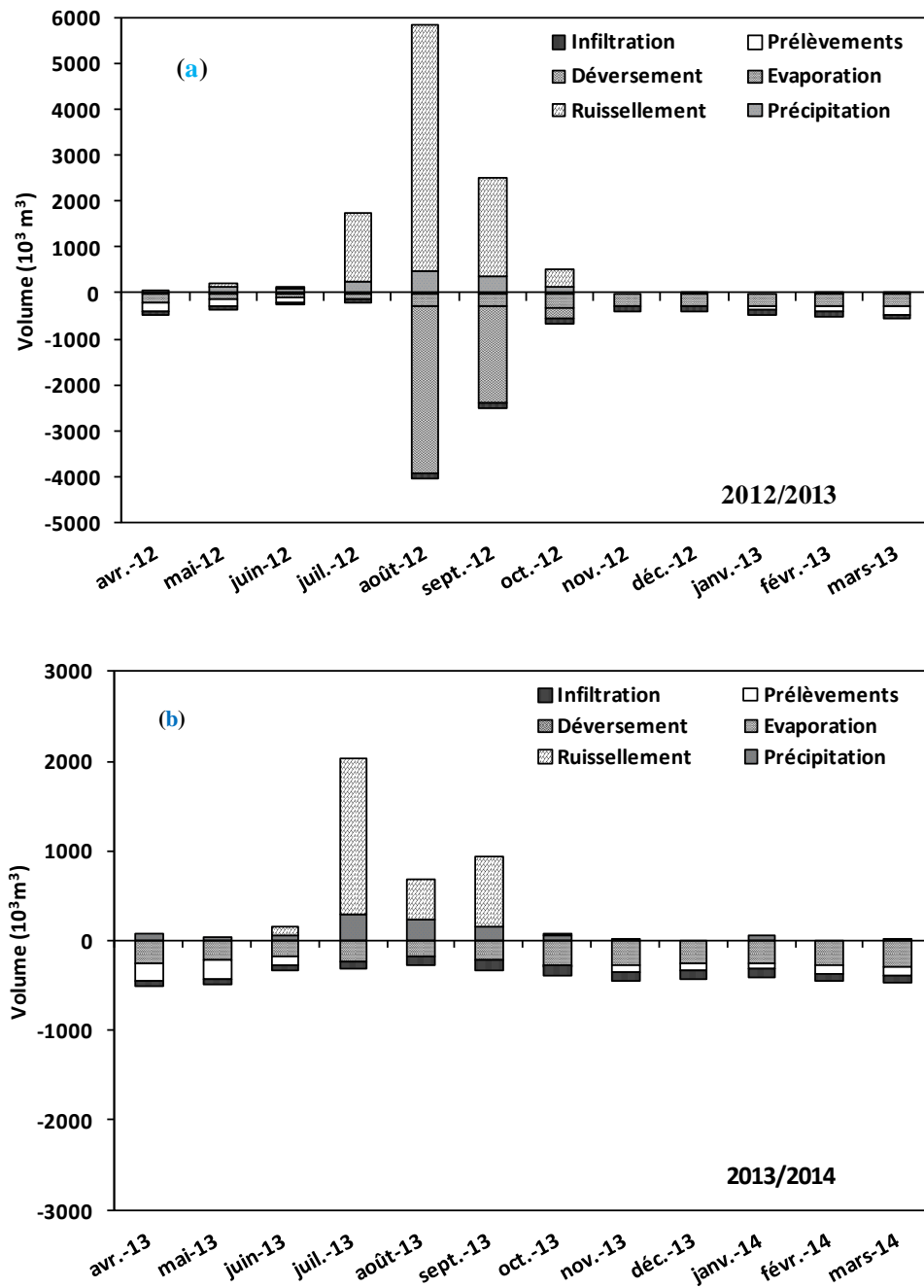


Figure 4 - 13 : Bilan hydrologique mensuel du barrage de Boura sur les périodes (a) avril-12/mars-13 (2012/2013) et (b) avril-13/mars-14 (2013/2014) : les flux entrants (partie positive) et les flux sortants (partie négative).

Conclusion partielle du chapitre 4

L'établissement du bilan du barrage constitue une étape importante pour l'optimisation de la gestion du réservoir. La détermination du bilan hydrologique a permis de caractériser le fonctionnement de l'hydro-système de Boura à différents pas de temps à travers sa dynamique de remplissage et de déstockage. Le bilan global sur la période du suivi hydrologique a indiqué que : de l'eau mobilisée par le réservoir (9,23 Mm³), 60% s'évaporent, 24% s'infiltrent et 19% sont prélevés pour satisfaire les demandes en particulier les demandes d'irrigation. L'analyse des termes du bilan de la retenue de Boura a révélé des fortes incertitudes sur les volumes infiltrés et les volumes prélevés. Le coefficient de remplissage est passé de 2,3 pour la saison 2012/2013 à seulement 0,7 pour la saison suivante 2013/2014. Ces résultats, montrent que même sur une courte période de suivi, le barrage de Boura présente une grande variabilité de son régime hydrique, due principalement aux irrégularités des apports qui sont contrôlés par la pluviométrie.

L'étude du bilan hydrologique s'avère être un outil important pour connaître les apports par ruissellement en provenance d'un bassin versant non jaugé en amont d'un barrage. Par conséquent, un réservoir serait susceptible de fournir une information de qualité et de quantité relativement satisfaisante et semblable à celle que l'on pourrait tirer d'une station classique de réseau hydrométrique. Il faut cependant pour cela que certaines conditions soient remplies :

- existence des lois volumétriques soignées du barrage ;
- suivi en continu des variations du plan d'eau du réservoir ;
- suivi des niveaux piézométriques autour du réservoir ;
- présence d'au moins un pluviomètre ou pluviographe au droit du barrage ;
- présence d'un bac évaporatoire à proximité du site ;
- contrôle effectif des divers prélèvements pour utilisation.

La base de données constituée grâce au suivi hydrologique et à l'étude du bilan du réservoir de Boura servira de point d'ancrage à la mise en œuvre des différents modèles (hydrologique, d'allocation en eau et de gestion) dans la suite de ce travail.

CHAPITRE 5 : MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT DU RESERVOIR DE BOURA



Après avoir caractérisé le fonctionnement du réservoir de Boura à travers l'étude de son bilan hydrologique, il est question dans ce chapitre de modéliser ou de conceptualiser certaines des composantes du bilan qui sont des variables d'intérêt de la gestion : apports, évaporation, demandes en eau et infiltration. Les modèles mis en œuvre permettront par la suite de transformer les scénarios climatiques qui seront projetés sur le bassin versant de Boura en scénarios d'écoulements et en scénarios de demandes en eau afin d'évaluer la réponse du système modélisé aux effets du changement climatique. De la même façon, l'outil qui sera développé pour optimiser la gestion hydraulique du réservoir de Boura, prendra en considération les relations liant les pertes par évaporation et par infiltration au niveau du réservoir et les stocks d'eau du réservoir.

Différents modèles ont été développés ou mis en œuvre. Nous avons utilisé le modèle hydrologique GR4J (Génie Rural, 4 paramètres, journalier) pour la reconstitution des apports sur le bassin versant. En ce qui concerne les besoins en eau des cultures, un modèle simple ne prenant pas en compte le bilan hydrique des sols a été mis en œuvre. Quant à l'allocation de l'eau entre les usagers, le modèle WEAP a été utilisé. La loi linéaire et la loi de puissance sont attribuées respectivement aux relations liant les variables évaporation et infiltration au niveau du réservoir et les stocks d'eau du réservoir. Le modèle de gestion fera l'objet du chapitre 6. La **Figure 5 - 1** présente les différents modèles (hydrologique, besoins en eau et allocation de l'eau) et les variables à reconstituer qui seront déployés dans cette étude.

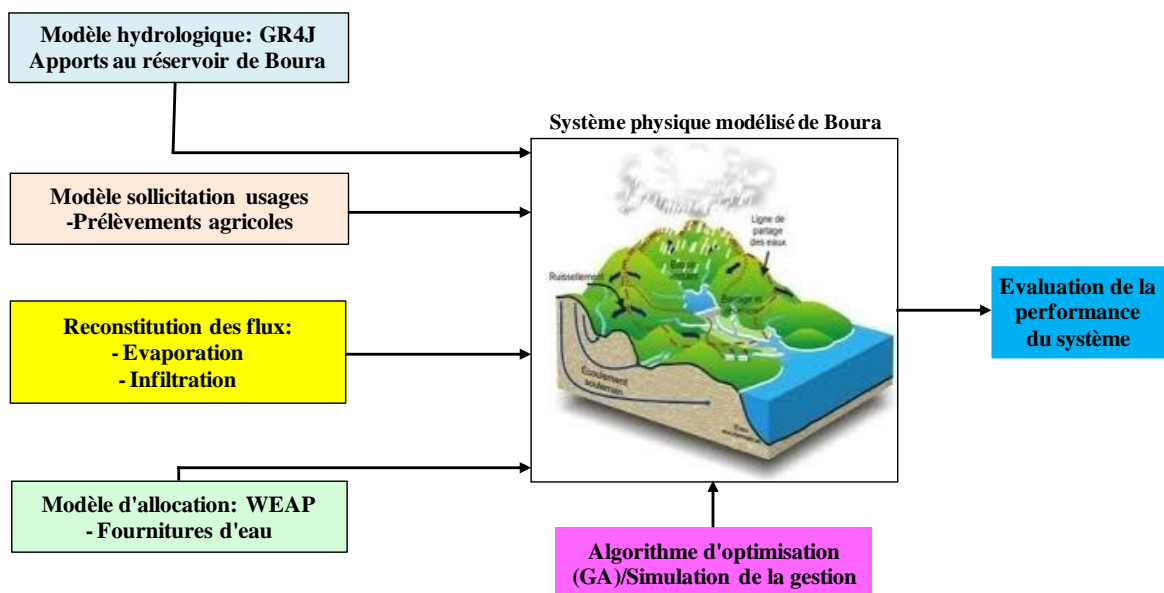


Figure 5 - 1 : Schéma de principe des interactions entre les différents sous modèles utilisés dans cette thèse.

5.1 Modélisation globale des apports dans le réservoir de Boura : le modèle GR4J

La modélisation pluie-débit vise à reproduire la réponse en débit d'un bassin versant aux observations de pluviométrie à un pas de temps défini. Plusieurs approches sont courantes en modélisation hydrologique du point de vue spatiale : l'approche globale (bassin considéré comme une unité à part entière) et l'approche semi-distribuée ou distribuée (bassin considéré comme un ensemble de sous-bassins ou de mailles). Le choix d'une approche dépend de la disponibilité des données. Le bassin versant amont du réservoir de Boura étant non jaugé (observations de débits absentes), l'approche de modélisation suivie dans le cadre de cette thèse sera globale à l'échelle du bassin.

5.1.1 Description du modèle GR4J

Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier, Perrin et al., 2003) a été sélectionné pour servir de base hydrologique à cette étude. C'est un modèle parcimonieux simulant les relations pluie-débit à un pas de temps journalier à l'échelle du bassin versant. Il dispose de quatre paramètres à optimiser et fait partie d'une famille de modèles hydrologiques développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques (annuel GR1A : Mouelhi et al., 2006a, mensuel GR2M : Mouelhi et al., 2006b, et horaire, Mathevet, 2005), et dont la première version journalière a été développée par Michel en 1983. Le modèle GR4J a été progressivement complété et amélioré (Edijatno, 1991; Nascimento, 1995; Edijatno et al., 1999; Perrin, 2000; Mouelhi, 2003). Le modèle GR4J a été retenu car il est réputé pour sa robustesse et son efficacité (Perrin et al., 2001; Payan, 2007).

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à la famille des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu (Perrin et al., 2007). La structure de GR4J (*Figure 5 - 2*) associe un réservoir de production, un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non-atmosphérique permettant de simuler le comportement hydrologique du bassin.

Le processus de la transformation pluie-débit dans un bassin versant se fait généralement aux moyens de deux fonctions :

- ♣ Une fonction de production faisant intervenir :
 - une fonction de neutralisation entre la pluie et l'ETP ;
 - une fonction de rendement dépendant d'un réservoir de suivi d'humidité du sol (qui se vide par évaporation et se vidange aussi par percolation) ;

- une fonction d'échange avec l'extérieur du bassin ;
- ♣ Une fonction de transfert présentant deux composantes d'écoulement :
 - l'une faisant intervenir un hydrogramme unitaire, avec une phase de montée, qui assure le transfert de 90% de la pluie efficace et qui est ensuite routée par un réservoir non linéaire ;
 - l'autre faisant intervenir un hydrogramme unitaire symétrique, qui assure le transfert des 10% restants de la pluie efficace.

Les quatre paramètres à calibrer du modèle GR4J sont :

- X_1 [mm]: Capacité maximale du réservoir de production ;
- X_2 [mm]: Coefficient d'échange entre le bassin versant et l'extérieur ;
- X_3 [mm]: Capacité maximale à un jour du réservoir de routage ou de transfert ;
- X_4 [jour]: Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1.

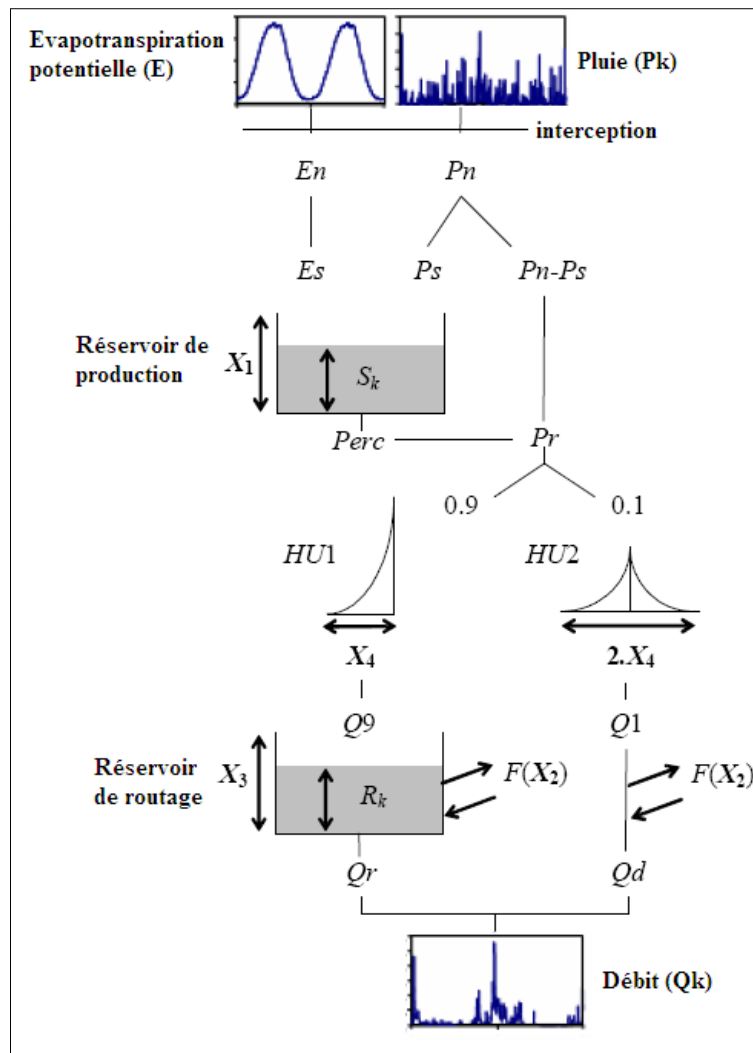


Figure 5 - 2 : Architecture du modèle GR4J.

Source : Adaptée de Perrin et al. (2003, 2007)

La description mathématique du modèle GR4J est détaillée en **Annexe 5.A**.

5.1.2 Calage du modèle GR4J

Le modèle global conceptuel GR4J a été utilisé pour simuler les débits sur une large gamme de bassins versants de taille 0,1 à plus de 50 000 km² à partir des chroniques de données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle (ETP) journalières, supposées uniformes sur le bassin versant. Les données de débits ne sont, quant à elles, nécessaires que pour le calage des paramètres du modèle.

Caler un modèle consiste à déterminer sur une période choisie un jeu optimum de paramètres qui convient le mieux à l'utilisation de ce modèle sur le bassin versant considéré. Grâce à la simplicité de sa structure et son faible nombre de paramètres, GR4J a été implémenté dans le tableur Excel. Les valeurs des paramètres du modèle sont optimisées en utilisant l'outil « *Solveur* » d'Excel.

La qualité du calage du modèle est généralement évaluée en prenant comme critère la valeur d'une fonction objectif. Cette fonction doit tendre vers une valeur donnée (minimum ou maximum) lorsque les valeurs simulées tendent vers celles observées. La fonction critère que nous avons retenue pour l'optimisation des paramètres du modèle est celle proposée par Nash and Sutcliffe (1970), notée "NS", largement utilisée en hydrologie. Trois transformations (NS1, NS2 et NS3) de ce critère d'évaluation sont utilisées pour juger les performances du modèle à simuler (i) les périodes de hautes eaux (forts débits), (ii) les périodes de basses eaux (faibles débits) et (iii) les périodes normales (débits moyens) (**Tableau 5 - 1**).

La formule de NS est exprimée par l'équation (5.1).

$$NS(\%) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i^{Obs} - Q_{moy}^{Obs})^2} \right] \quad (5.1)$$

Où Q_i^{Obs} et Q_i^{Sim} désignent respectivement les débits observé et simulé (ou calculé) au jour i ; Q_{moy}^{Obs} le débit moyen journalier observé au cours de la période de simulation et N : nombre de pas de temps (en jours) de simulation.

Le modèle ajusté est dit parfait quand la valeur de NS vaut 100% (erreur du modèle nulle), les données de débits simulés correspondent exactement aux données de débits observés. A l'inverse, une valeur de NS inférieure à 50% ne donnera pas une concordance satisfaisante et

donc acceptable entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle (Moriassi et al., 2007).

Tableau 5 - 1 : Variables des critères d'ajustement.

Variables	Informations	NS
Q	Débites forts	NS1
$Q^{1/2}$	Débites moyens	NS2
$\log(Q)$	Faibles débits	NS3

Le période du suivi hydrologique du réservoir de Boura (1^{er} avril 2012 au 1^{er} avril 2014) servira de période de calage du modèle. Les données de précipitation et d'évaporation issues de ce suivi sont utilisées en entrée du modèle GR4J. L'ETP est obtenue à partir des mesures journalières de l'évaporation sur bac (E_{bac}). Les données des écoulements reconstitués à partir du bilan (cf. chapitre 4) sont utilisées comme des observations pour le calage du modèle.

Le calage du modèle GR4J est fait sur les deux années de suivi hydrologique (2012/2013 et 2013/2014). Les valeurs des paramètres optimisés du modèle obtenues pour le critère NS1 sont : $X_1 = 457$ mm ; $X_2 = -8,1$ mm ; $X_3 = 40,8$ mm et $X_4 = 1,5$ jours. Les gammes de variation des paramètres du modèle GR4J pour différents intervalles de confiance obtenues sur un large échantillon de bassins versants situés dans différentes conditions climatiques (de semi-arides à tropicale humide) sont présentées dans le **Tableau 5 - 2**. A l'exception de la valeur du coefficient d'échanges souterrains X_2 , les valeurs des autres paramètres se trouvent dans les différents intervalles de confiance à un seuil de 20% proposés par Perrin et al. (2003). En se servant des résultats des travaux de Randrianasolo (2012) sur un échantillon de 211 bassins versants en France (superficies variantes entre 183 et 9380 km²), les paramètres X_2 et X_4 sont hors des bandes de confiance à 90%. Cependant, les intervalles de variation des paramètres du modèle GR4J ont été étendus à un seuil de significativité de 2% sur un ensemble d'environ 1000 bassins versants en France (Shin et al., 2013). Ainsi, tous les paramètres optimisés du modèle obtenus dans ce travail respectent les différentes gammes de variation. Une perte en eau vers la nappe souterraine est observée dans le système ($X_2 < 0$) pour pouvoir équilibrer le bilan en eau. Le décalage progressif entre les précipitations et les apports au niveau de la retenue qui représente le temps de concentration du bassin versant est de l'ordre de 2 jours.

Tableau 5 - 2: Synthèse des valeurs des paramètres du modèle GR4J pour différents intervalles de confiance (Shin et al., 2013).

Paramètres	Perrin et al. (2003)		Randianasolo (2012)		Shin et al. (2013)
	Médiane	Intervalle de confiance à 80%	Médiane	Intervalle de confiance à 90%	Intervalle de confiance à 98%
X ₁ (mm)	350	[100 ; 1200]	305	[213 ; 1113]	[50 ; 5000]
X ₂ (mm)	0	[-5 ; 3]	-0,9	[-2,6 ; 0]	[-15 ; 4]
X ₃ (mm)	90	[20 ; 300]	63	[33 ; 113]	[10 ; 1300]
X ₄ (Jours)	1,7	[1,1 ; 2,9]	1,7	[1,9 ; 3,6]	[0,5 ; 5]

La valeur de la fonction critère NS1 de calage est de 67,6% tandis que celles des fonctions d'évaluation NS2 et NS3 sont respectivement 63,5% et 42,3%. Les valeurs des critères NS1 et NS2 sont supérieures à 60%, le modèle ainsi calé peut être considéré comme satisfaisant ou acceptable (Moriassi et al., 2007). Les valeurs des critères NS1 et NS2 sont proches, le modèle donne une importance équivalente entre les périodes de hautes eaux et les périodes de débits moyens. Cependant, la valeur de NS3 est inférieure à 50%, le modèle calé ne simule pas bien les basses eaux.

Le seul examen des valeurs de la fonction critère ne peut suffire à juger de la qualité du modèle en termes d'hydrologie. Pour cela, il faut aussi examiner les tracés des hydrogrammes observés et calculés. La **Figure 5 - 3a** montre les hydrogrammes des débits journaliers observés et calculés pour le bassin de Boura sur la période de calage. Nous rappelons que les valeurs observées sont déduites des variations de volumes du barrage lors des crues. La dynamique des écoulements n'est pas parfaitement reproduite. Les pics de crue sont plus ou moins bien simulés. La **Figure 5 - 3b** montre que le modèle GR4J sous-estime certains pics de crues.

La période de suivi étant très courte, les données collectées ont seulement permis de calibrer le modèle GR4J. Par conséquent, le modèle n'a pas été validé. Nous supposons pour la suite de ce travail que l'environnement actuel du bassin versant va rester figé (états de surface inchangés) et que les paramètres du modèle GR4J et les hydrogrammes unitaires obtenus sur la période de calage resteront stables dans le futur. Le modèle ainsi calibré servira à la scénarisation hydrologique dans les conditions de changement climatique.

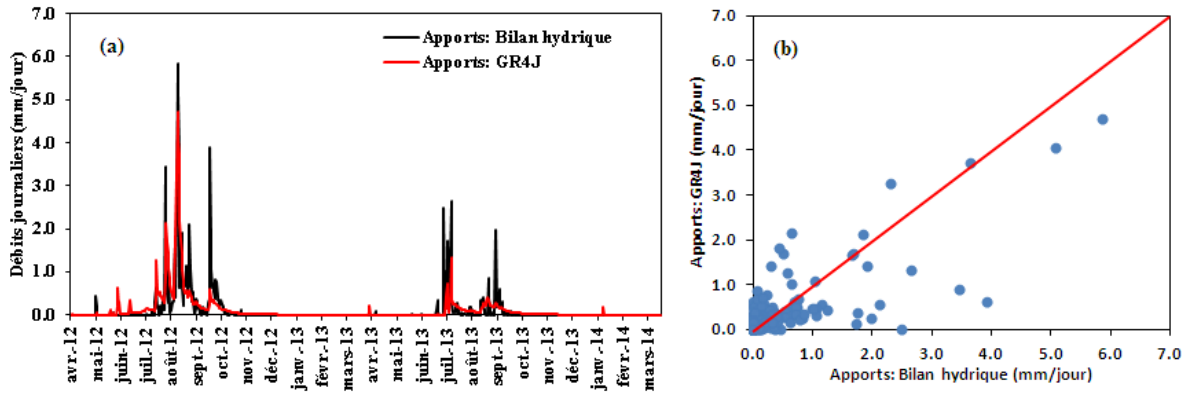


Figure 5 - 3 : (a) Hydrogrammes des apports observés (bilan hydrique) et simulés (GR4J) pour le bassin versant du barrage de Boura et (b) Comparaison des débits observés et calculés entre Avril 2012-Mars 2014.

5.1.3 Analyse de la sensibilité du modèle GR4J

L'analyse de sensibilité est considérée comme une phase importante de la démarche de modélisation. Dans son sens le plus général, l'analyse de la sensibilité (AS) d'un modèle hydrologique consiste à explorer et à évaluer l'effet d'éventuelles erreurs soit sur les données d'entrée (Loucks & Van Beek, 2005; Oudin et al., 2005; Xu et al., 2006; Meselhe et al., 2009; Ibrahim, 2012), soit dans la structure du modèle (Le Moine et al., 2007; Pushpalatha et al., 2011) ou encore sur les paramètres du modèle (Sieber & Uhlenbrook, 2005; Huang & Liang, 2006), sur les différentes sorties du modèle tant en terme de critères de performance qu'en terme de volumes écoulés (Iooss, 2011). McCuen (1973) définit la sensibilité comme une mesure locale de l'effet de la variation d'une variable du système sur une autre (approche locale). Ce type d'analyse donne une idée de la dépendance du modèle à différents types d'entrée (Saltelli et al., 2004; Saltelli & Annoni, 2010).

Dans le cadre de cette étude, nous allons nous intéresser à l'analyse de la sensibilité du modèle GR4J aux données d'entrée. Plusieurs études (Paturel et al., 1995; Andreassian et al., 2004; Oudin, 2004) ont montré que les modèles GR (Génie Rural) sont relativement peu sensibles aux variations de données d'ETP qui n'ont que peu d'incidence sur les performances de simulations de débits par les modèles hydrologiques.

Sur la base des études précédemment citées, l'AS du modèle GR4J sera consacrée à l'évaluation des perturbations relatives de la variable d'entrée précipitation sur les écoulements en termes de taux de variation de la lame d'eau moyenne annuelle écoulée. Ainsi, pour évaluer l'impact des erreurs systématiques de précipitations, nous avons utilisé un simple coefficient multiplicatif appliqué à toutes les valeurs de précipitations journalières observées (P_j) sur la période 1971-2000 :

$$P_j^{es} = k \times P_j \quad (5.2)$$

Où k est un coefficient permettant de tester plusieurs niveaux de surestimation (+10%, +20% et +30%) et de sous-estimation (-10%, -20% et -30%) des précipitations.

La sensibilité hydrologique est mesurée comme la variation relative de l'écoulement moyen annuel. Il ressort de ces analyses que pour une gamme de variation des précipitations comprise entre -30% et +30%, les débits simulés par le modèle GR4J pourront varier dans une plage de -85% à +180%. On observe notamment (**Figure 5 - 4**) qu'une surestimation des précipitations engendre en valeur absolue une erreur relative plus importante des écoulements qu'une sous-estimation de même ordre. Par exemple, pour une surestimation des précipitations de 30%, la lame d'eau écoulee moyenne annuelle simulée par le modèle GR4J augmente de 177%, tandis qu'une sous-estimation des précipitations de 30% conduit à une sous-estimation de la lame d'eau moyenne écoulee de 85%. Le signal de l'augmentation des précipitations est amplifié au niveau des écoulements. D'après Xu et al. (2006), l'importance du changement relatif des écoulements peut être fortement liée à la faible valeur du coefficient d'écoulement.

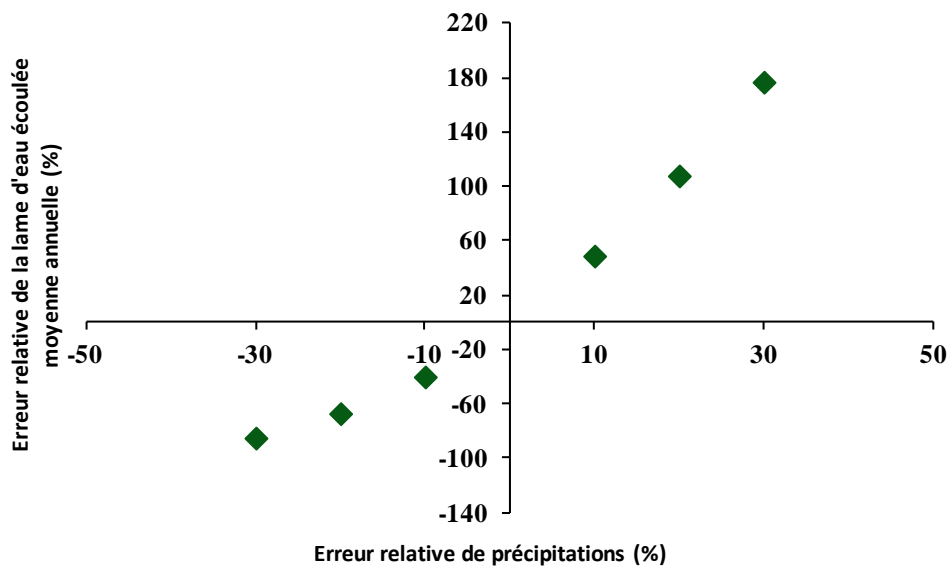


Figure 5 - 4: Effet des erreurs systématiques de précipitation sur les lames d'eau écoulees moyennes annuelles avec le modèle GR4J pour le bassin versant du barrage de Boura.

Oudin et al. (2006) ont étudié sur un échantillon de 12 bassins aux Etats-Unis les performances du modèle GR4J aux erreurs systématiques des précipitations. Ils ont observé que les performances du modèle GR4J diminuent lorsque les précipitations sont surestimées ou sous-estimées et que cette baisse de performance est plus accentuée avec la surestimation des précipitations.

5.2 Modélisation de la demande en eau agricole

5.2.1 Besoins en eau des cultures

Selon la définition donnée par Allen et al. (1998), le besoin en eau d'une culture est « la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol en termes de fertilité et d'humidité, et réalisant son potentiel de production sous les conditions climatiques considérées ». Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ET_c). Les demandes en eau des cultures pendant une période donnée dépendent de l'étendue des superficies mises en culture, des types de cultures et de leur stade végétatif. Ces besoins sont d'autant plus importants que le potentiel évaporatoire de l'atmosphère est élevé, et que les stocks d'eau dans les sols, mobilisables localement par les plantes, sont limités.

Plusieurs approches sont mises en œuvre pour la détermination des besoins en eau des cultures (Marek et al., 1988; Hazrat et al., 2000; Palomo et al., 2002). On distingue les approches expérimentales ou méthodes directes (méthode du bilan hydrique des sols, méthode lysimétrique et méthode du bilan d'énergie) et les approches basées sur des modèles ou méthode indirectes (approche climatique). Nous utiliserons dans cette thèse l'approche climatique basée sur la méthode proposée par Allen et al. (1998). Ainsi, pour une culture donnée, le besoin en eau à une date t peut être estimé par l'équation (5.3).

$$ETC_t = Kc_t \times ETP_t \quad (5.3)$$

Où ETP_t [mm] représente l'évapotranspiration de référence à la date t et Kc_t (sans dimension) correspond au coefficient cultural à la même date.

5.2.2 Coefficients culturaux

Le coefficient cultural Kc , traduit l'effet de la culture sur l'évapotranspiration. Il est fonction des caractéristiques de la culture et des conditions climatiques. Pour une même culture, le coefficient cultural varie pendant la saison culturale en fonction du stade de croissance. Il augmente progressivement du semis à la période de pleine croissance, puis diminue généralement durant la maturation des cultures annuelles (*Figure 5 - 5*).

Pour différents types de cultures usuelles, des tableaux de coefficients culturaux sont disponibles en ligne (<http://www.agrometeo.fr/>). Ces données associées à celles proposées par Allen et al. (1998) sont exploitées pour avoir les coefficients culturaux sur le site à Boura.

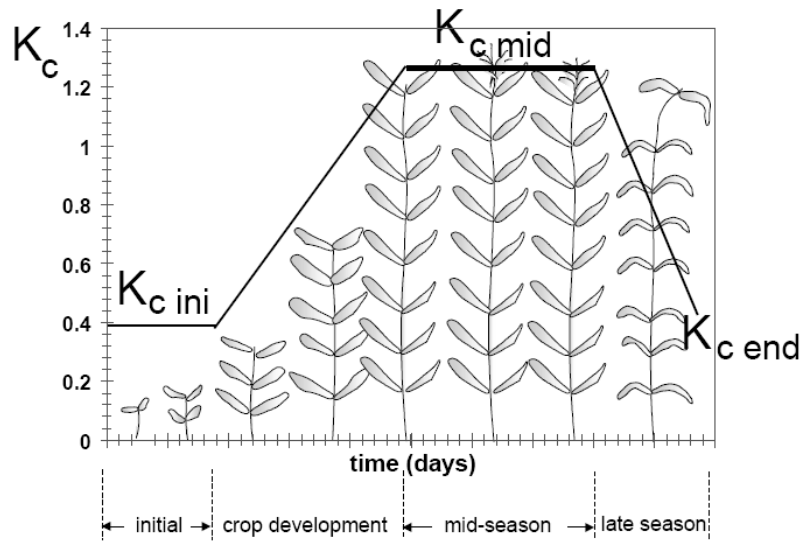


Figure 5 - 5 : Courbe représentative de l'évolution du coefficient cultural pour une culture particulière (d'après Allen et al., 1998).

5.2.3 Besoins en eau d'irrigation

Les besoins nets d'irrigation dépendent des besoins en eau des cultures et des ressources en eau locales mobilisables par ces dernières. Si les stocks en eau dans les sols sont suffisants, l'irrigation n'est pas nécessaire. Elle le devient dès que le déficit d'évapotranspiration des plantes est observé. Localement, cela se produit lorsque la demande en eau des cultures est supérieure à la réserve utile. Les besoins en irrigation sont alors d'autant plus importants que la demande en eau des plantes est forte et que le stress hydrique lié à un taux d'humidité réduit dans les sols est fort. La modélisation des besoins en eau d'irrigation proposée est bâtie sur le bilan climatique et ne fait pas intervenir les notions liées au sol. Pour une culture donnée, les besoins nets en eau d'irrigation (BN) à une date t sont estimés par l'équation (5.4) :

$$BN_t = ETc_t - P_{\text{eff } t} \quad (5.4)$$

Où $P_{\text{eff } t}$ [mm] représente la pluie efficace.

Selon Doorenbos and Pruitt (1977), la pluie efficace est la fraction des précipitations stockées dans la zone racinaire c'est-à-dire la part des précipitations effectivement utilisée par les cultures. Différentes méthodes ont été développées pour le calcul de la pluie efficace, chacune prenant en compte le climat de la région où doivent s'effectuer les mesures. Selon Smith (1992), elle peut être exprimée pour un mois donné t par le système d'équations (5.5) :

$$\begin{cases} P_{\text{eff } t} = 0,6 \times P_t - 10, & \text{si } P_t \leq 70 \text{ mm} \\ P_{\text{eff } t} = 0,8 \times P_t - 24, & \text{si } P_t > 70 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.5)$$

Où P_t est la pluie moyenne mensuelle du mois t .

En termes de volume, la demande en eau d'irrigation d'une culture donnée « cp » doit prendre en compte la superficie mise en valeur pour cette culture. Les volumes d'eau d'irrigation sont obtenus à partir de l'équation (5.6) :

$$D_t^{cp} = 10 \times BN_t^{cp} \times A^{cp} \quad (5.6)$$

Où D_t^{cp} [m^3] représente la demande en eau d'irrigation à la date t pour la culture « cp » et A^{cp} [ha] la superficie mise en valeur pour la culture « cp ».

Les enquêtes agricoles effectuées à Boura sur les périodes 2012/2013 et 2013/2014 ont permis d'évaluer les superficies mises en cultures et les besoins nets d'irrigation (**Tableau 5 - 3**).

Tableau 5 - 3 : Besoins nets d'irrigation pendant la contre-saison pour différentes spéculations culturales à Boura pour toute la période de culture.

Cultures	Période de culture	Superficie (ha)	Superficie (ha)	Besoins nets d'irrigation (m^3/ha)
		2012/2013	2013/2014	
Tomate	15 Novembre-15 Mars	7,2	17,5	5325
Maïs	15 Février-15 Juin	7,4	3,4	4920
Riz	15 Février-15 Juin	68,7	49,3	8600

5.3 Reconstitution des flux évaporés et infiltrés au niveau du réservoir de Boura

Il est indispensable d'établir les relations caractéristiques temporelles liant les composantes évaporées et infiltrées au niveau du réservoir et le volume stocké dans la retenue. Les paramètres de ces relations seront déduits des données estimées des volumes évaporés et des volumes infiltrés sur la période de suivi (avril 2012-mars 2014).

5.3.1 Reconstitution des flux évaporés : loi linéaire

Le volume évaporé d'une retenue dépend de la surface moyenne du plan d'eau et de la vitesse d'évaporation. Afin de prendre en compte l'effet de l'évaporation dans la modélisation du fonctionnement d'un réservoir sur un horizon de planification, de nombreuses études (Karamouz et al., 2003; Obeng-asiedu, 2004; Ahmed & Sarma, 2005; Moradi-Jalal et al., 2007; Celeste & Billib, 2009; Regulwar & Kamodkar, 2010; Jahangirzadeh et al., 2012) ont linéarisé la loi volumétrique exprimant l'évolution de la surface du réservoir en fonction du volume stocké. La surface évaporée peut être approximée comme le montre la **Figure 5 - 6** et les pertes par évaporation exprimées par l'équation (5.7).

$$V_{e_rec}^t = a_a E_{ret}^t \left(\frac{V^t + V^{t-1}}{2} \right) + a_0 E_{ret}^t \quad (5.7)$$

Où a_0 [ha] et a_a [ha/Mm³] sont les paramètres à déterminer et E_{ret}^t [mm] représente la lame d'eau évaporée sur la retenue pendant la période t. Ces paramètres sont obtenus grâce à l'optimisation de la fonction critère des écarts quadratiques moyens des séries de volume évaporé mesuré et reconstitué. Les volumes évaporés mesurés tiennent compte de la morphologie de la cuvette (cf. chapitre 4)

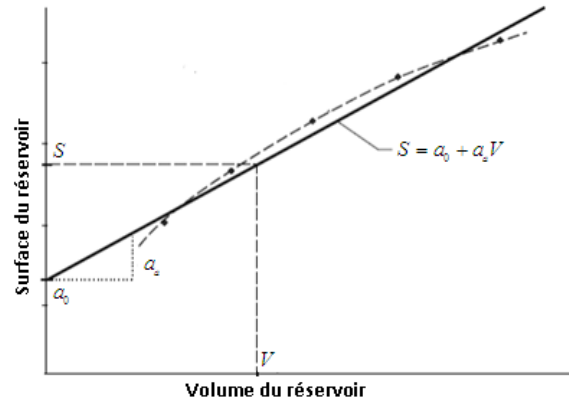


Figure 5 - 6 : Courbe théorique de la surface du réservoir en fonction du volume stocké.

Les nuages de points des volumes évaporés mesurés et reconstitués sont situés autour de la première bissectrice (**Figure 5 - 7**). L'application du test de Mann and Whitney (1947) (cf. **Annexe 5.B.**) au seuil de significativité de 5% montre que la différence entre les deux séries de volume évaporé (série calculée et série reconstituée) n'est pas significative (p-value = 0,69 > 0,05). Le coefficient de corrélation de Pearson entre les deux séries est de 0,99. Le modèle linéaire avec les paramètres optimisés $a_0 = 60,95$ ha et $a_a = 35,41$ ha/Mm³ sera suffisamment robuste pour reconstituer les volumes évaporés connaissant les stocks d'eau. On peut remarquer que, le paramètre a_0 obtenu est proche de la surface du réservoir (56,17 ha) correspondant à la capacité morte comme formulé par Obeng-asiedu (2004), Ahmed & Sarma (2005) et Celeste & Billib (2009).

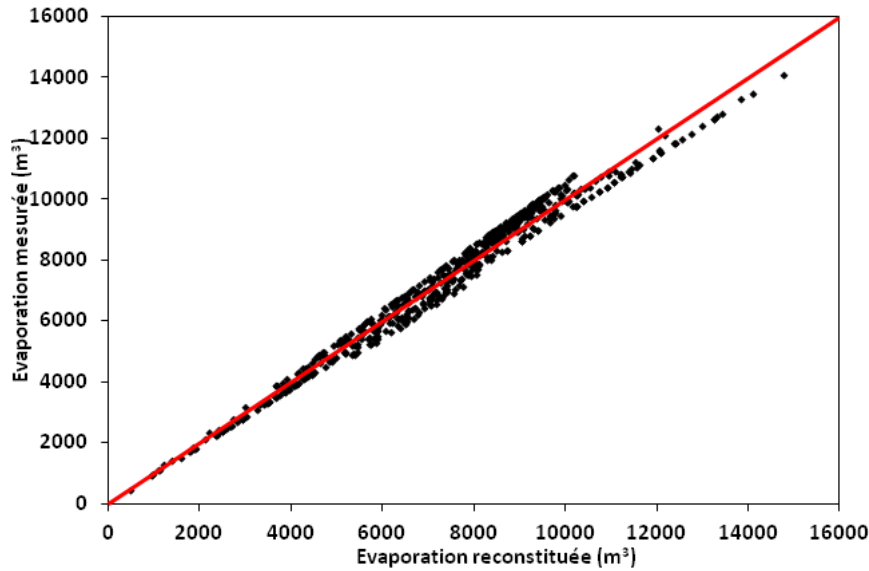


Figure 5 - 7 : Comparaison des volumes évaporés mesurés et reconstitués au niveau du réservoir de Boura.

5.3.2 Reconstitution des infiltrations : loi de puissance

Les pertes par infiltration et les fuites dépendent fortement du niveau de stock d'eau dans le barrage et par conséquent du stock d'eau mobilisé. Dans le cadre de cette thèse, une relation de puissance exprimée par l'équation (5.8), et généralement utilisée par les hydrogéologues (Pabiot, 1999) est mise en œuvre.

$$V_{i_rec}^t = \alpha_o + \phi_o (V^t)^{\delta_o} \quad (5.8)$$

Où α_o [m^3], ϕ_o [$m^3/(Mm^3)^{1/\delta_o}$], δ_o [-] sont les paramètres du modèle à déterminer.

Les nuages de points des volumes infiltrés estimés (bilan hydrologique) et reconstitués (loi de puissance) sont situés autour de la première bissectrice (**Figure 5 - 8**). L'application du test Mann-Whitney au seuil de significativité de 5% montre que la différence entre les deux séries de volume infiltré n'est pas significative ($p\text{-value} = 0,81 > 0,05$). La loi de puissance avec pour paramètres $\alpha_o = 0$, $\phi_o = 1,0313$ et $\delta_o = 0,5466$ permet de bien reconstituer les volumes infiltrés au niveau de la retenue en fonction des volumes d'eau stockés.

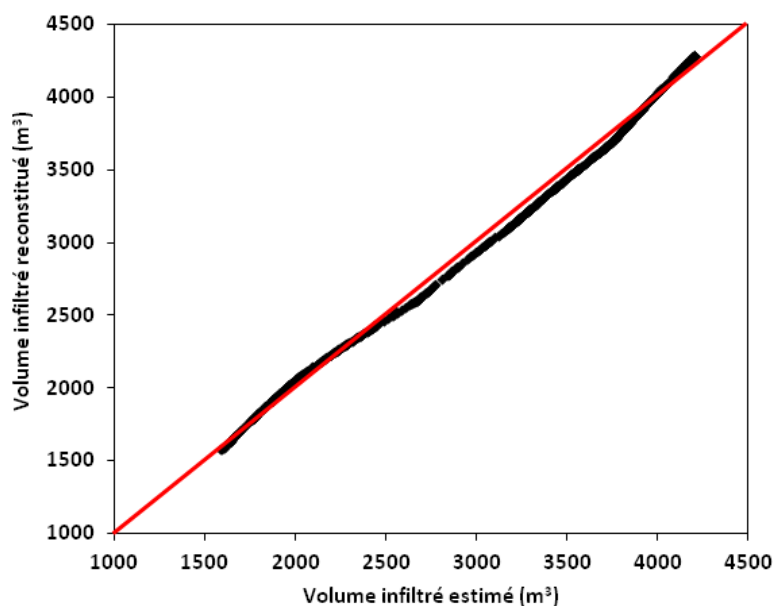


Figure 5 - 8 : Comparaison entre les volumes infiltrés estimés à partir du bilan hydrologique et ceux reconstitués à partir du modèle de puissance.

5.4 Modélisation de l'allocation d'eau du réservoir de Boura par WEAP

Dans cette section, les principales caractéristiques du modèle d'évaluation et de planification des ressources en eau (WEAP) sont présentées et une application de WEAP à la simulation du réservoir de Boura est réalisée.

5.4.1 Description du modèle WEAP

Le système d'Évaluation et de Planification de l'Eau (*Water Evaluation And Planning system* : WEAP en anglais) a été développé en 1988 par l'Institut de l'Environnement de Stockholm à l'Institut Tellus de Boston aux États-Unis (*Stockholm Environment Institute: SEI*). WEAP a été conçu comme un outil d'allocation des ressources en eau qui permet aux décideurs de modifier de façon interactive (simulation ou adaptation en temps réel) les fournitures d'eau entre différents usagers de manière à mieux adapter leurs objectifs (Rukuni, 2006). Le logiciel WEAP est téléchargeable gratuitement sur le site : <http://www.weap21.org>.

WEAP fonctionne sur les principes de base du bilan d'eau. Dépendant des objectifs des utilisateurs, le modèle WEAP peut être utilisé soit comme une base de données, soit comme un outil de prévisions, soit encore comme un outil d'analyse de stratégies (Le Roy, 2005; Sieber & Purkey, 2005). L'outil WEAP vise à combler le « gap » entre la gestion de l'eau et la simulation des écoulements des bassins versants en agissant à la fois sur les facteurs biophysiques qui influencent les écoulements et sur les facteurs socio-économiques qui affectent les niveaux de demande domestique, agricole et industrielle et la gestion des réservoirs artificiels (Höllermann et al., 2010).

Le système est représenté en termes de diverses sources d'approvisionnement (rivières, eaux souterraines et barrages-réservoirs), de transferts d'eau (retraits, transmission), de demandes en eau et d'exigences des écosystèmes. La structure des données peut être facilement personnalisée pour atteindre les exigences d'une analyse particulière et pour refléter les contraintes imposées par des données restreintes (Yates et al., 2005).

Les applications de WEAP incluent généralement plusieurs étapes :

- La *définition du cadre d'étude* qui intègre l'identification de la période de simulation, des limites spatiales, des composantes du système et la configuration du problème ;
- La création de l'*état actuel* qui est plus ou moins la situation actuelle du système en étude ;
- La création des *Scénarios* qui sont construits sur la base de l'état actuel. Ils permettent d'explorer les impacts d'hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité et l'usage de l'eau dans le futur ;
- L'*évaluation* des scénarios à l'égard par exemple de la disponibilité des ressources en eau pour le système considéré.

Dans cette étude, le modèle WEAP version 3.4347 est utilisé comme modèle d'allocation de l'eau pour simuler les fournitures d'eau au niveau du réservoir de Boura nécessaires pour la satisfaction des demandes en eau des usagers.

5.4.2 Elaboration du schéma conceptuel de fonctionnement du système étudié

Les principaux objets modélisés par WEAP sont montrés à la **Figure 5 - 9**. Les points verts et rouges représentent respectivement les sites de demandes agricoles (CorikabD, CorikabW, Toumho, Piam) et les demandes pour le cheptel (LS) et la population (City). La ligne continue bleue matérialise le cours d'eau sur lequel est construit le barrage de Boura. Le système possède deux sources d'eau : le réservoir de Boura (Dam) et l'aquifère sous-adjacent (GW). L'interaction entre les deux sources est matérialisée par un transfert d'eau du réservoir vers l'aquifère (trait jaune). Les traits verts sont les liaisons de transmission des sources vers les sites de demandes tandis que les traits discontinus bleus représentent la percolation vers l'aquifère ou le drainage vers le cours d'eau au niveau des sites agricoles. On suppose que tous les sites de demandes ont la même priorité de satisfaction en eau égale à 1. Généralement on attribue au réservoir une priorité inférieure à celle des sites de demande d'où la priorité 2 affectée au réservoir.

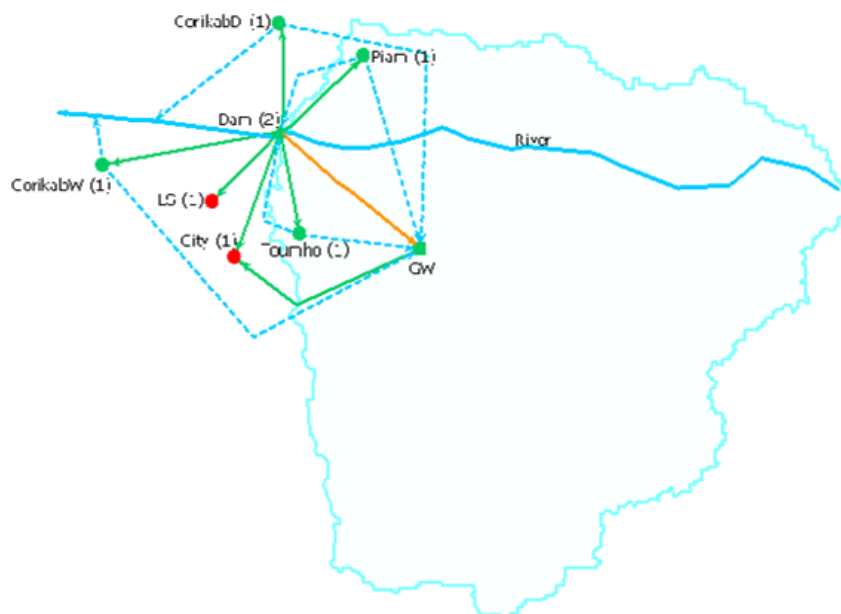


Figure 5 - 9 : Schéma conceptuel de l'hydrosystème de Boura modélisé dans WEAP.

Le modèle WEAP fonctionnant sur le principe du bilan d'eau, les données nécessaires (**Tableau 5 - 4**) pour la simulation du réservoir de Boura par WEAP sont celles constituées au chapitre 4 sur la période de suivi hydrologique.

Tableau 5 - 4 : Récapitulatif des données nécessaires pour la simulation du réservoir de Boura avec WEAP.

Données en entrée de WEAP	
Caractéristiques physiques du réservoir	*) Capacité maximale du réservoir *) Capacité initiale au début de la simulation *) Points topographiques de la cuvette *) Contraintes hydrauliques (débit maximum de la vanne)
Usages de l'eau du réservoir	*) Agricole *) Cheptel *) Domestique
Apports du bassin en amont du réservoir	Apports en termes de ruissellement
Evaporation nette	Différence entre évaporation et précipitation
Pertes par infiltration	Infiltration du réservoir vers la nappe souterraine
Niveaux d'eau observés du réservoir	Calibration du modèle WEAP
Liaisons de transmission	Efficiéce du système
Règles d'exploitation du réservoir	Fonctionnement par zones (active et inactive)

5.4.3 Simulation du fonctionnement de la retenue de Boura

L'année 2013 est choisie comme année de base. Elle s'étale sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013 dont le début coïncide avec la campagne maraîchère. Sur cette période, les demandes en eau estimées pour les différents usages sont représentées à la **Figure 5 - 10**. On

peut observer que, l'irrigation est le plus gros consommateur de la ressource en eau disponible à Boura. Elle représente près de 90% des besoins totaux de l'ensemble des usages. Pour des raisons sanitaires, l'approvisionnement en eau des populations pour les usages domestiques se fait au niveau des forages et puits collectifs. Ainsi, pour la demande du site city, les préférences 1 et 2 ont été attribuées respectivement à la source souterraine (GW) et à la source de surface (réservoir).

L'efficacité du système est supposée égale à 65% c'est-à-dire que 35% des fournitures d'eau du réservoir sont perdues à travers le système d'irrigation. Malgré cela, sur la période de suivi 2012/2013, on aboutit à une couverture totale de 100% des demandes exprimées correspondant à une satisfaction totale des demandes en eau agricoles.

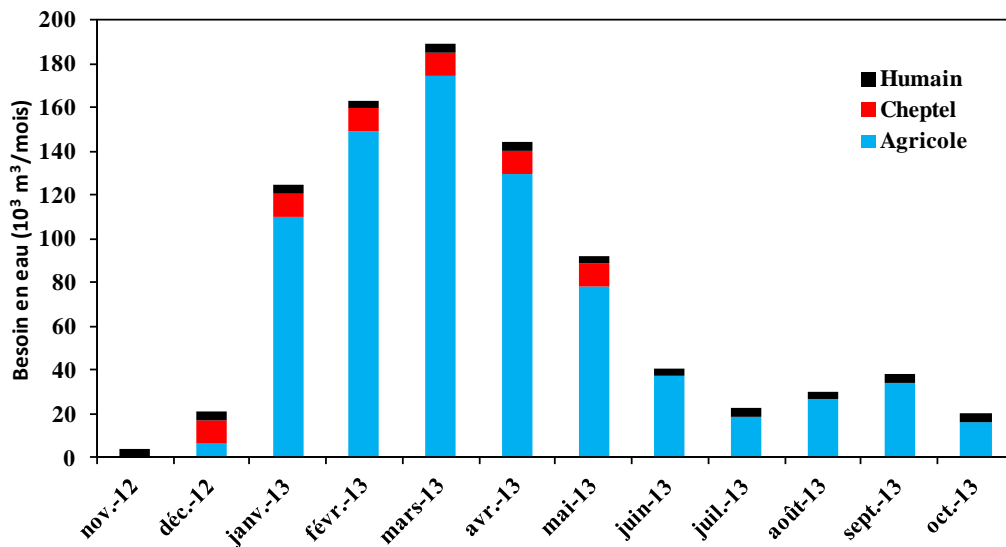


Figure 5 - 10 : Evolution des demandes en eau mensuelles pour différentes sollicitations au niveau de la retenue de Boura sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.

Les simulations du fonctionnement du réservoir de Boura sur l'année 2013 sont faites aux pas de temps journalier et mensuel. Les **Figure 5 - 11** et **Figure 5 - 12** montrent l'évolution journalière et mensuelle des stocks d'eau du réservoir observés et simulés. Les données observées au pas de temps mensuel sont obtenues en agrégeant à l'échelle mensuelle les données journalières. Il ressort de l'appréciation visuelle de ces graphes que les volumes du réservoir sont sous-estimés sur la période de décrue et légèrement surestimés pendant la période de remplissage. Néanmoins, le test statistique non paramétrique de Mann-Whitney (Cf. Annexe **5.B.**) appliqué aux séries de données (observées et simulées) du volume du réservoir au seuil de significativité de 5% montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux séries de valeurs ($p\text{-value} = 0,76 > 0,05$).

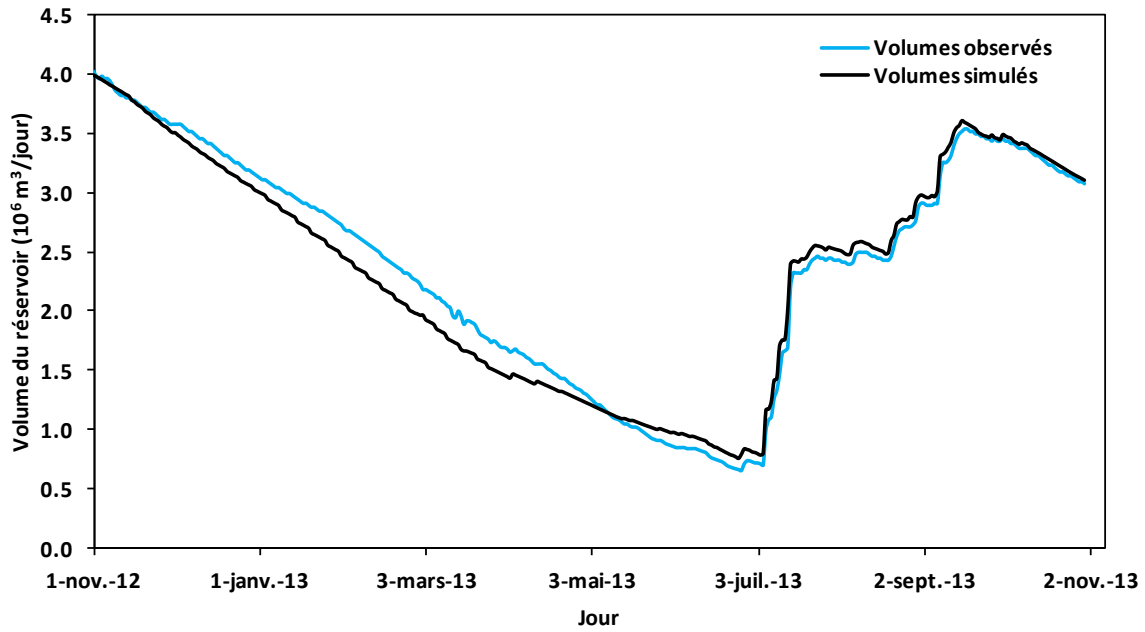


Figure 5 - 11 : Courbes observée et simulée (WEAP) de remplissage du réservoir de Boura au pas de temps journalier sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.

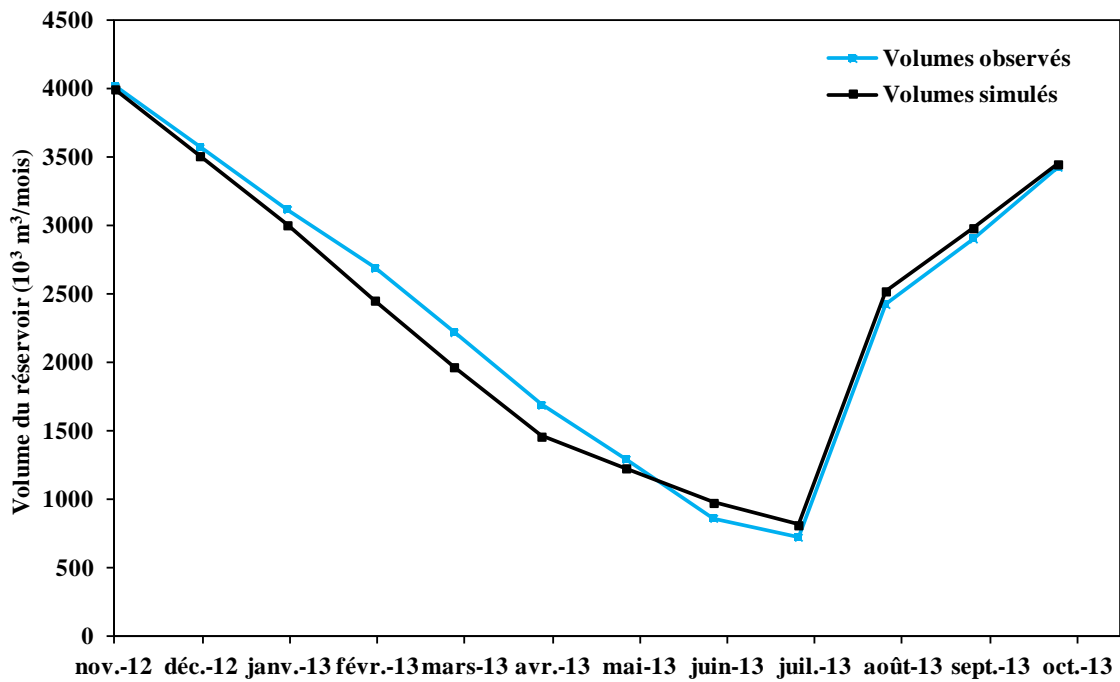


Figure 5 - 12 : Courbes observée et simulée (WEAP) de remplissage du réservoir de Boura au pas de temps mensuel sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.

En plus de ces examens (visuel et test non paramétrique), les performances de l’outil de simulation sont aussi appréciées à travers trois critères statistiques évalués sur les séries du volume du réservoir : le critère Nash-Sutcliffe (NS), le pourcentage de biais noté "PBIAS" (Gupta et al., 1999; Dawson et al., 2007) et le rapport de la racine carrée de l’erreur quadratique moyenne entre observations et simulations à l’écart-type des données observées

noté "RSR" (Legates & McCabe, 1999). Ces critères adimensionnels fournissent une évaluation relative du modèle de simulation, et sont exprimés par les équations (5.9), (5.10) et (5.11).

$$NS(\%) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^N (V_j^{Obs} - V_j^{Sim})^2}{\sum_{j=1}^N (V_j^{Obs} - V_{moy}^{Obs})^2} \right] \quad (5.9)$$

$$PBIAS(\%) = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^N (V_j^{Obs} - V_j^{Sim})}{\sum_{j=1}^N V_j^{Obs}} \quad (5.10)$$

$$RSR(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (V_j^{Obs} - V_j^{Sim})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (V_j^{Obs} - V_{moy}^{Obs})^2}} \quad (5.11)$$

Où V_j^{Obs} et V_j^{Sim} désignent respectivement les volumes du réservoir observé et simulé au jour/mois j ; V_{moy}^{Obs} le volume moyen journalier/mensuel du réservoir observé au cours de la période de simulation et N : nombre de pas de temps de simulation.

Selon Moriasi et al. (2007), un modèle de simulation peut être jugé satisfaisant si $NS > 50\%$ et $RSR \leq 70\%$, et si $PBIAS < \pm 25\%$. Le **Tableau 5 - 5** regroupe les valeurs des critères de performance évaluées respectivement sur les données journalières et mensuelles. Les valeurs des trois critères se situent dans les intervalles correspondant à l'attribution du qualificatif «Très Bon» comme performance au modèle de simulation (Moriasi et al., 2007). Les faibles valeurs positives de PBIAS indiquent que le modèle sous-estime légèrement les volumes du réservoir (Gupta et al., 1999). Les faibles valeurs de RSR confirment la bonne qualité des simulations.

Au regard des résultats présentés ci-dessus, nous pouvons dire que le modèle WEAP ainsi renseigné, simule très bien les volumes du réservoir de Boura. Ce modèle WEAP au pas de temps mensuel sera par la suite utilisé au chapitre 7 pour effectuer les simulations du réservoir sous les scénarios de développement sous contraintes du changement climatique.

Tableau 5 - 5 : Critères de performance de l'outil WEAP pour la simulation des volumes du réservoir de Boura.

Variable	Données journalières			Données mensuelles		
	NSE (%)	PBIAS (%)	RSR (%)	NSE (%)	PBIAS (%)	RSR (%)
Critères de performance						
Modèle WEAP	97,8	1,6	5,6	98,5	2,0	5,9

Conclusion partielle du chapitre 5

Un premier travail a donc été de conceptualiser les différents modèles pour la reconstitution de certaines composantes du bilan d'eau pour le fonctionnement du réservoir de Boura. Il s'est agi de reconstituer les apports (modèle GR4J), les flux infiltrés (loi de puissance), les flux évaporés (modèle linéaire) et les variations des stocks du réservoir (modèle WEAP). Les usages agricoles de l'eau sont aussi conceptualisés avec des hypothèses simplificatrices (non prise en compte du bilan hydrique des sols).

Ce travail a été réalisé via les différents développements présentés dans ce chapitre. Les modèles calibrés seront par la suite utilisés pour faire des projections sur les apports dans le réservoir de Boura (GR4J), sur les demandes en eau agricoles et sur le fonctionnement du réservoir de Boura (WEAP) selon différents scénarios de changement climatique et de développement socio-économique. Les relations caractéristiques établies entre les variables d'état du système (volumes évaporés/volumes stockés et volumes infiltrés/volumes stockés) seront intégrées dans la fonction d'évolution du système modélisé à travers l'outil d'optimisation de la gestion des réservoirs qui sera développé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6 : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'OPTIMISATION DE LA GESTION DU RÉSERVOIR DE BOURA



Dans ce chapitre, nous présentons de façon détaillée la démarche de développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion optimale d'un système de ressources en eau avec une application à l'hydro-système de Boura. Une partie des résultats de ce chapitre a fait l'objet d'un article scientifique publié dans la revue *Water Resources Management* dont le titre est : « **OPTIWAM: An Intelligent tool for OPTimizing Irrigation Water Management in a coupled reservoir-groundwater systems** » (cf. publications).

6.1 Problématique et objectifs de gestion du réservoir

Comme pour la plupart des ouvrages de faibles capacités en Afrique de l'Ouest, le réservoir d'eau de Boura est principalement utilisé pour l'irrigation et l'abreuvement du cheptel en saison sèche et sert à l'irrigation d'appoint pour le riz pluvial en cas des poches de sécheresse. Les autres usages tels que la pêche, la fabrication des briques et les usages domestiques sont secondaires. Cependant, malgré d'énormes investissements qui sont consacrés à la construction et à la réhabilitation des petits barrages en Afrique de l'Ouest, de nombreuses études pointent du doigt leurs performances sous-optimales (Faulkner et al., 2008; Mdemu et al., 2009; Venot & Cecchi, 2011; de Fraiture et al., 2014).

Les problèmes généralement rencontrés au niveau des petits réservoirs sont ceux de la gestion optimale des ressources en eau et de l'utilisation efficiente des potentiels d'eau disponibles. Gérer un réservoir hydraulique de façon « optimale » consiste à définir une série de décisions de lâchers (lâchers optimums) qui maximisent le(s) critère(s) de satisfaction sur l'ensemble de la période de gestion. Nous aborderons dans cette étude le problème de la gestion optimale du réservoir. Pour ce faire, trois (3) objectifs de gestion ont été identifiés :

- *Satisfaire au mieux les demandes en eau agricoles ;*
- *Garantir un stock d'eau conséquent pour permettre le développement des activités halieutiques voire aquacoles, et maintenir l'écosystème aquatique (réserve écologique) ;*
- *Minimiser la perte de productivité physique de l'eau liée à l'agriculture.*

Les scénarios de gestion qui seraient proposés, devraient respecter essentiellement :

- *Les limites acceptables de stockage des sources d'approvisionnement en eau ;*
- *Les capacités de prélèvement d'eau.*

6.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation de la gestion

Le développement d'un modèle d'optimisation se base sur les variables d'état du système, les variables de décision et sur la formulation des fonctions objectifs et des contraintes associées au système, et sur le choix de la technique d'optimisation (Pabiot, 1999). Ces concepts de base pour un problème de gestion des réservoirs sont définis en **Annexe 6.A**.

6.2.1 Elaboration des fonctions objectifs

Dans cette étude, le problème d'optimisation de la gestion du réservoir de Boura est considéré comme un problème d'optimisation multi-objectifs (3 objectifs) sous contraintes.

Le **premier objectif** est de satisfaire les besoins en eau agricoles sur l'horizon temporel de gestion T . Cet objectif est exprimé par la minimisation de la fonction f_{DNS} qui représente la somme normée des carrés des déficits en eau aux différents sites agricoles (Celeste & Billib, 2009; Pilpayeh et al., 2010; Bazargan et al., 2011; Jothiprakash et al., 2011; Wang et al., 2011; Giuliani et al., 2014).

$$f_{DNS} = \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\frac{\sum_{sw=1}^{Nsw} (F_{sw,d}^t - D_d^t)}{\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{max} D_{sw,d}} \right)^2 \quad (6.1)$$

où Δt est le pas de temps de gestion, ND le nombre de sites de demande, Nsw le nombre de sources d'eau de surface du domaine de gestion ;

sw et d représentent respectivement les indices affectés aux sources de surface et aux sites de demande en eau ;

$F_{sw,d}^t$ est la fourniture d'eau à partir des sources sw au site de demande d à la date t ;

$F_{max} D_{sw,d}$ est la fourniture maximale d'eau à partir des sources sw au site de demande d ;

D_d^t la demande en eau au site d à la date t . Elle dépend des besoins nets d'irrigation (cf. chapitre 5), de l'efficacité du réseau de distribution entre les sources d'approvisionnement et les sites de demande et de l'efficacité de l'irrigation à la parcelle.

Le **second objectif** est de garantir une réserve écologique pour le maintien de l'écosystème aquatique et pour le développement des activités halieutiques et aquacoles. Cet objectif qui a un caractère à la fois environnemental et économique, est exprimé par la minimisation de la fonction f_{NR} qui représente le non remplissage du réservoir (Pabiot, 1999; Tran et al., 2011).

$$f_{NR} = \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{sw=1}^{N_{sw}} \left(\frac{V_{sw}^t - V_{\max_sw}}{V_{\max_sw}} \right)^2 \quad (6.2)$$

Où V_{\max_sw} et V_{sw}^t sont respectivement la capacité maximale de stockage et le volume stocké à la fin de la période t du réservoir de surface sw .

Le *troisième objectif* est d'améliorer la productivité physique de l'eau liée à l'agriculture sur la période de gestion. La productivité physique de l'eau étant le rapport de la production totale [kg/ha] par unité de volume d'eau (Playán & Mateos, 2006; Mdemu et al., 2009). Cet objectif est exprimé par la minimisation de la fonction f_{WP} qui représente les pertes de la productivité agricole.

$$f_{WP} = \left(\frac{WP_{\max} - WP}{WP_{\max}} \right)^2 \quad (6.3)$$

où WP_{\max} est la productivité maximale de l'eau [kg/m³] et WP la productivité de l'eau sur l'horizon temporel T [kg/m³]. Les fonctions de production de l'eau peuvent être considérées sur la base de l'évapotranspiration maximale ou des besoins nets ou sur la base des besoins bruts.

WP et WP_{\max} sont exprimées par les équations (6.4) et (6.5) :

$$WP = \frac{\sum_{d=1}^{ND} \sum_{cp=1}^{N_{cp}} \omega_{cp} \times Y_{d,cp} \times A_{d,cp}}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\sum_{sw=1}^{N_{sw}} F_{sw,d}^t \right)} \quad (6.4)$$

$$WP_{\max} = \frac{\sum_{cp=1}^{N_{cp}} \omega_{cp} \times Y_{\max_cp}}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{cp=1}^{N_{cp}} ETM_{cp}^t} \quad (6.5)$$

$$\sum_{cp=1}^{N_{cp}} \omega_{cp} = 1 \quad (6.6)$$

où $Y_{d,cp}$ est le rendement de la production agricole du site d correspondant à la culture cp sur l'horizon de gestion T [kg/ha] ; $Y_{\max,cp}$ le rendement potentiel de la production de la culture cp [kg/ha] ; ω_{cp} le coefficient de pondération pour la culture cp ; $A_{d,cp}$ la superficie emblavée pour la culture cp au site d [ha] et ETM_{cp}^t l'évapotranspiration maximale de la culture cp à la date t [m^3/ha].

En général, l'irrigation concerne plusieurs cultures. En supposant que le rationnement de l'irrigation s'effectue uniformément sur toutes les cultures (Fang, 1989 ; Paudyal & Manguerra, 1990), le rendement de la production agricole au site d correspondant à la culture cp est donné par l'équation (6.7) :

$$\frac{Y_{d,cp}}{Y_{\max,cp}} = 1 - \sum_{t=\Delta t}^T k_{ycp}^t \times \left(1 - \frac{\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t}{D_d^t} \right) \quad (6.7)$$

où k_{ycp}^t est le facteur de stress hydrique de la culture cp à la date t .

Hypothèses

- Nous supposons que, les poids attribués aux cultures relèvent d'une décision stratégique du gestionnaire dépendant de l'environnement socio-économique (marché, réserve importante d'une denrée, etc.) ;
- Nous considérons l'eau comme le seul facteur pouvant avoir une influence sur les rendements, toutes les autres conditions agronomiques étant supposées optimales (Steduto et al., 2012).

6.2.2 Expression des contraintes

Les contraintes des limites acceptables de stockage et des capacités de prélèvement sont applicables à chaque source d'approvisionnement. De même, l'équation de conservation des volumes doit être respectée à chaque pas de temps de gestion. Ainsi, pour chaque source de surface sw , les apports I_{sw}^t et les sorties O_{sw}^t sont définis par :

$$I_{sw}^t = V_{rs_sw}^t + V_{p_sw}^t \quad (6.8)$$

$$O_{sw}^t = V_{e_sw}^t + V_{i_sw}^t + V_{d_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} F_{sw,d}^t \quad (6.9)$$

où $V_{rs_sw}^t$ et $V_{p_sw}^t$ sont respectivement les apports par ruissellement et par précipitation au niveau du réservoir sw pendant la période t ; $V_{e_sw}^t$, $V_{i_sw}^t$ et $V_{d_sw}^t$ sont respectivement les volumes évaporés, infiltrés et déversés au niveau du réservoir sw pendant la période t .

Pour modéliser le fonctionnement du réservoir, les lois établies au chapitre 5 exprimant les volumes évaporés et infiltrés en fonction des volumes stockés seront utilisées (cf. équations 5.7 et 5.8).

Au début de l'horizon de gestion, les capacités initiales des sources doivent être précisées. L'équation (6.10) exprime cette condition initiale:

$$V_{sw}^0 = V_{ini_sw}, \forall sw \quad (6.10)$$

Où V_{sw}^0 est le volume initial de la source sw .

Le modèle global d'optimisation de la gestion du réservoir de Boura peut être donc formulé comme à l'équation (6.11) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } (f_{DNS}, f_{NR}, f_{WP}) \\ \quad F_{sw,d}^t \\ \text{tel que} \\ V_{\min_sw} \leq V_{sw}^t \leq V_{\max_sw} \quad \forall d, \forall t, \forall sw \\ 0 \leq F_{sw,d}^t \leq F_{\max_sw,d} \\ V_{sw}^t = V_{sw}^{t-\Delta t} + I_{sw}^t - O_{sw}^t \\ V_{sw}^0 = V_{ini_sw} \end{array} \right. \quad (6.11)$$

Les variables de décision ($F_{sw,d}^t$) sont les fournitures d'eau à partir des sources aux sites de demande. Le **Tableau 6 - 1** montre l'architecture de la détermination du nombre de variables de décision relatif au problème formulé pour un pas de temps. Le nombre de variables décisionnelles qui correspond à la taille d'une solution (TS) au problème est déterminé à partir de l'équation (6.12) :

$$TS = ND \times N_{sw} \times \frac{T}{\Delta t} \quad (6.12)$$

Tableau 6 - 1: Architecture du nombre de variables de décision pour un pas de temps Δt .

Pas de temps	Δt																			
Sources	1			.			.			Nsw										
Sites de demande	1	.	.	ND	1	2	.	ND	1	.	.	ND	1	.	.	ND	1	.	.	ND

6.3 Elaboration du prototype du système à optimiser

Le modèle conceptuel du système modélisé est présenté à la **Figure 6 - 1**. Le prototype très simplifié est constitué d'un réservoir de surface SW(1), d'un aquifère GW(1) et d'un site de demande D(1). Ce système comprend une liaison de transmission (trait continu) pour la desserte du site de demande dont la capacité maximale de transmission est $F_{max}SW(1,1)$. Il y a également deux transferts virtuels (traits interrompus) vers l'aquifère GW(1) à partir du site de demande par percolation profonde DP(1,t) et du réservoir par infiltration $V_{i_sw(1)}^t$. Le réservoir de surface est alimenté par les apports de son bassin versant $V_{rs_sw(1)}^t$ et subi également des pertes par évaporation nette $V_{e_sw(1)}^t$. Le site de demande D(1) alimenté de façon gravitaire est situé en aval du réservoir de surface. L'aquifère GW(1) est considéré comme une source illimitée et n'est pas sollicité pour l'irrigation.

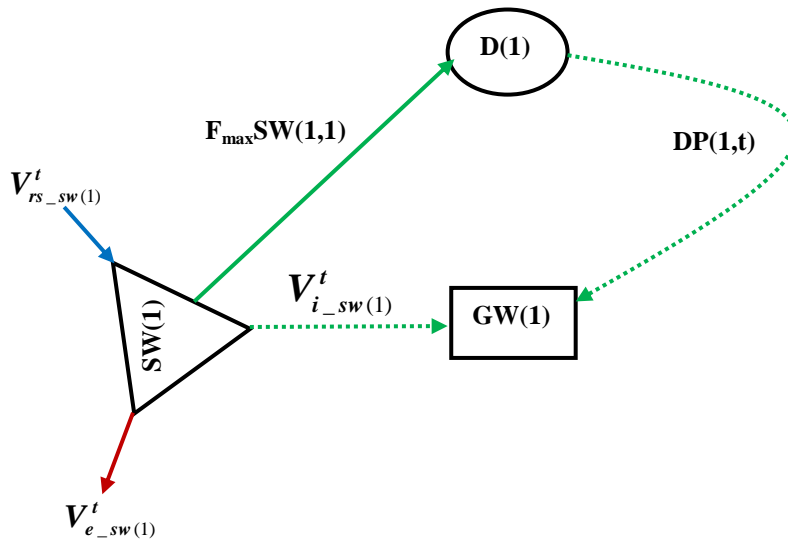


Figure 6 - 1: Schéma conceptuel du système modélisé.

Les données du prototype sont issues du suivi hydrologique et des enquêtes sur les usages effectuées (cf. chapitres 4 et 5). Il s'agit :

- Des données sur les ouvrages hydrauliques (barrage et périmètre irrigué) ;

- Des données climatiques (évaporation, précipitation, évapotranspiration de référence, etc.) ;
- Les apports du bassin versant de la retenue de Boura ;
- Des données agronomiques (types de culture, coefficients culturaux, superficies des cultures, facteurs de stress hydrique, etc.).

L'horizon temporel d'optimisation est sur un cycle hydrologique (novembre 2012 à octobre 2013). Nous avons opté pour le pas de temps mensuel, qui est une échelle temporelle adéquate pour les gestionnaires des réservoirs hydrauliques dans les environnements où les données journalières sont souvent moins accessibles. Pour le cas du prototype défini, on a 12 variables de décision ($ND = 1$, $N_{SW} = 1$, $T = 12$ et $\Delta t = 1$).

6.4 Mise en œuvre de l'algorithme génétique

6.4.1 Fonction d'adaptation

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme génétique (AG) mono-objectif pour la résolution du problème d'optimisation formulé à l'équation (6.11). Un bref historique des AGs ainsi que le processus de leur paramétrage sont décrits en **Annexe 6.C**. Une fonction d'adaptation positive encore appelée « *fitness* » est construite par la méthode d'agrégation (cf. **Annexe 6.B**.) pour évaluer la performance de chaque solution au problème. La solution la mieux adaptée est celle qui a la plus grande valeur de fitness.

Ainsi, à chaque fonction objectif f_q , on associe une fonction uniformité F_q dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Cette fonction est exprimée par l'équation (6.13) :

$$F_q(s) = \frac{1}{1 + f_q(s)} \quad (6.13)$$

La fonction d'adaptation intégrant les 3 objectifs peut être exprimée par l'équation (6.14) :

$$F_{ad}(s) = \sum_q w_q \times F_q(s), \quad q \in \{DNS, NR, WP\} \quad (6.14)$$

$$\sum_q w_q = 1, \quad w_q > 0$$

Où w_q est le coefficient de pondération associé à la fonction d'évaluation F_q .

6.4.2 Fonctions de pénalité associées aux limites des capacités du réservoir

Afin de tenir compte des violations possibles des limites acceptables des niveaux de stockage du réservoir de surface dans l'évaluation des performances des solutions « s », on associe à la fonction uniformité un terme de pénalité « $Pénalité_NR(s)$ ». Ainsi, la fonction uniformité F_q devient F_q^{pn} et définie par l'équation (6.15) :

$$F_q^{pn}(s) = F_q(s) \times (1 + Pénalité_NR(s)) \quad (6.15)$$

Si on dispose d'un ensemble de solutions ne satisfaisant pas nécessairement toutes les contraintes du problème considéré, les violations de contraintes sont alors prises en compte par la fonction objectif à optimiser qui pénalise ces violations (Nouiri, 2007, 2014).

La fonction objectif f_{NR} devrait prendre en compte les violations des limites acceptables des niveaux de stockage du réservoir de surface. La fonction uniformité associée à cette fonction objectif f_{NR} est exprimée par l'équation (6.16) :

$$F_{NR}^{pn}(s) = F_{NR}(s) \times (1 + Viol_{\max} V_{\max_sw} + Viol_{\max} V_{\min_sw}) \quad (6.16)$$

Où

$Viol_{\max} V_{\max_sw}$ est la violation maximale de la pénalité de violation de la capacité maximale du réservoir sw sur l'horizon de gestion et exprimée par l'équation (6.17) :

$$Viol_{\max} V_{\max_sw} = \max \left(0, \frac{V_{sw}^t - V_{\max_sw}}{V_{\max_sw}} \right), \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (6.17)$$

$Viol_{\max} V_{\min_sw}$ est la violation maximale de la pénalité de la capacité morte (capacité minimale) du réservoir sw sur l'horizon de gestion et exprimée par l'équation (6.18) :

$$Viol_{\max} V_{\min_sw} = \max \left(0, \frac{V_{\min_sw} - V_{sw}^t}{V_{\min_sw}} \right), \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (6.18)$$

Les fonctions de pénalité définies par les équations (6.17) et (6.18) donnent des résultats entre 0 (lorsqu'il n'y a pas de violation) et 1 (lorsque la violation est maximale).

6.4.3 Structuration du programme d'optimisation sous Visual Basic

L'environnement de programmation Visual Basic (VB6) est utilisé comme support informatique à la mise en œuvre de l'algorithme d'optimisation. Le programme d'optimisation sous VB6 est subdivisé en quatre blocs :

Bloc 1 : Variables et fichiers d'entrée du programme

- Déclaration de toutes les variables du programme
- Lecture des fichiers des paramètres du modèle conceptuel et du modèle d'optimisation
- Lecture des fichiers des données (ouvrages hydrauliques, climatiques, agronomiques, économiques)
- Lecture du fichier des poids attribués aux objectifs

Bloc 2 : Ecriture des fonctions objectifs dans le langage de programmation

- Ecriture des fonctions de génération des solutions
- Ecriture des fonctions objectifs formulées ainsi que les contraintes associées

Bloc 3 : Mise en œuvre de l'algorithme d'optimisation

- Elaboration de la procédure de création de la population initiale de solutions
- Elaboration de la procédure d'évaluation des solutions créées
- Elaboration de la procédure de génération d'une nouvelle population (stratégie d'élitisme, sélection pour la reproduction, croisement, mutation)
- Elaboration de la procédure d'évaluation de la nouvelle population créée

Bloc 4 : Création des fichiers en sortie du programme

- Ecriture du fichier des fonctions objectifs et de la fonction d'adaptation
- Ecriture du fichier des variables de décision (fournitures d'eau)
- Ecriture du fichier des variables d'état (stocks d'eau du réservoir)
- Ecriture du fichier des rendements des cultures sur l'horizon de gestion

L'évaluation d'une solution donnée du problème d'optimisation formulé doit se faire selon la démarche de la **Figure 6 - 2**.

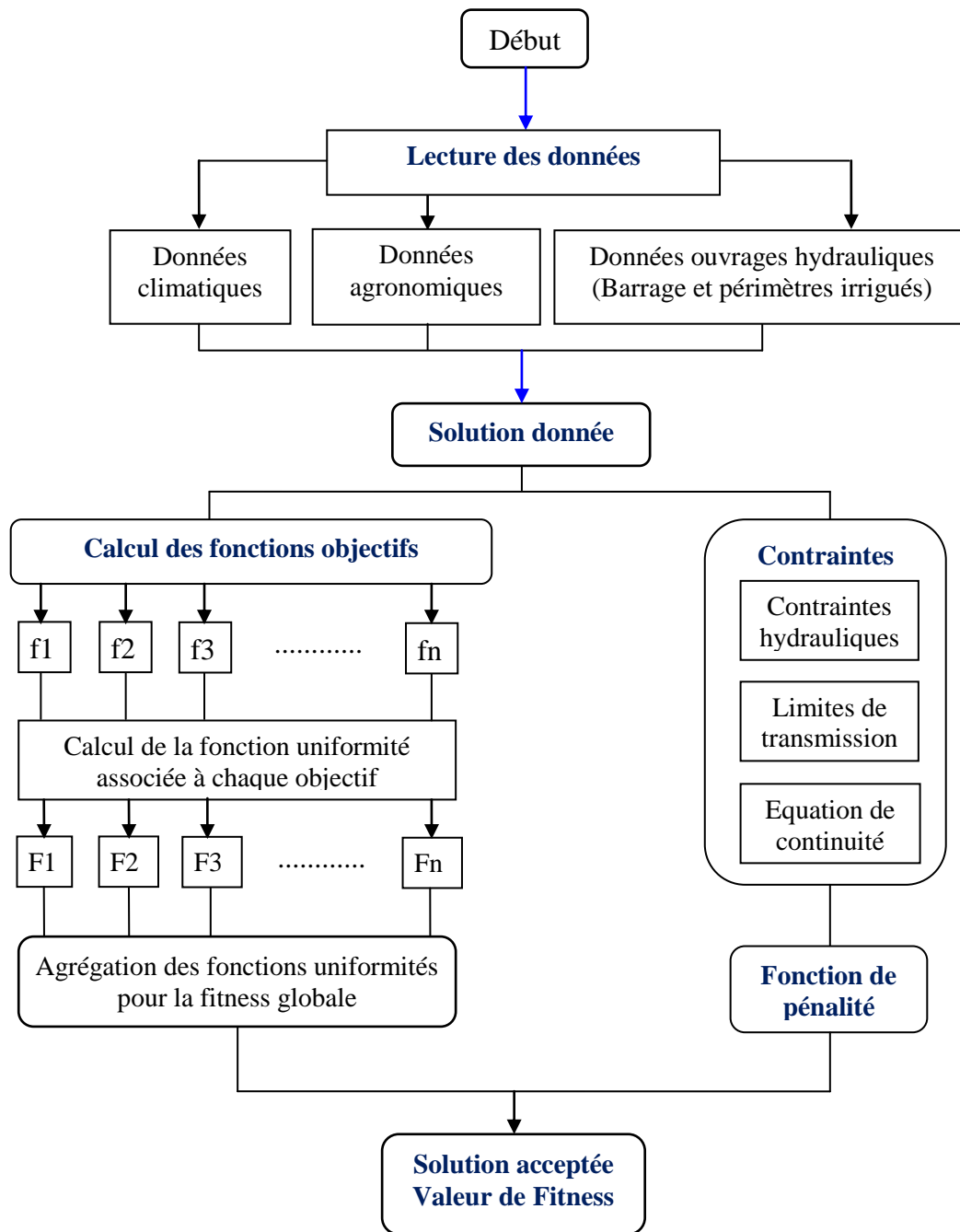


Figure 6 - 2 : Algorithme d'évaluation d'une solution donnée au problème formulé.

6.5 Indicateurs de la performance du système de gestion

Une étape importante dans l'application des modèles d'optimisation et de simulation pour la gestion des systèmes de ressources en eau est l'usage des indices statistiques de performance (Fowler et al., 2003; Loucks & Van Beek, 2005; Jain & Bhunya, 2008; Mathlouthi & Lebdi, 2008; Louati et al., 2011; Jofreh et al., 2013). Un certain nombre d'indices a été introduit au cours des trois dernières décennies pour évaluer la performance des systèmes de ressources en eau (Hashimoto et al., 1982; Moy et al., 1986; Vogel & Bolognese, 1995; McMahon et al.,

2006; Asefa et al., 2014). Ces indices se basent sur une analyse statistique des caractéristiques des défaillances du système ou des épisodes défaillants. Le choix de ces indices de performance dépend énormément du problème étudié (Hashimoto et al., 1982; Nandalal & Bogardi, 1996; Milutin, 1998).

6.5.1 Incidents ou défaillances du système de gestion

L'objectif de définir ce que peut être un événement dommageable doit permettre d'évaluer les mesures de performance et d'apprécier la règle de gestion lors de la simulation. Les incidents peuvent être de différentes natures. On s'intéressera dans cette étude aux incidents liés à la violation des limites acceptables de stockage du réservoir et à la demande d'irrigation non satisfaite. Ainsi, trois types d'incidents sont définis :

- ♣ **Défaillance du stock:** pendant la période de gestion le stock du réservoir est inférieur à sa capacité minimale. Cette situation dépend à la fois des aléas hydrologiques et de la politique de gestion suivie ;
- ♣ **Demande non satisfaite:** à un instant donné, le stock d'eau dans le réservoir n'arrive pas à satisfaire pleinement les demandes exprimées ;
- ♣ **Déversement:** ceci n'est pas à proprement parler un incident. Il apparaît lorsque pendant la période de gestion, le stock du réservoir est supérieur à sa capacité maximale.

A chaque incident, on associe, pour une règle de gestion donnée, divers critères ou indices de performance.

6.5.2 Critères de performance du système de gestion

Pour caractériser le fonctionnement d'un système de gestion, qu'il soit réel ou modélisé, deux types d'indicateurs sont habituellement utilisés (Baptiste, 2013). Il s'agit des indicateurs qualitatifs tels que les *courbes de stock* du réservoir et les indicateurs quantitatifs tels que la fiabilité, la résilience et la vulnérabilité ou encore les critères *RRV (Reliability, Resilience and Vulnerability)*.

6.5.2.1 Courbes de stock du réservoir

Les phases de déstockage durant la saison sèche et de remplissage pendant la saison de pluie qui résument le fonctionnement du système de gestion, peuvent être appréciées à travers l'évolution temporelle des stocks d'eau du réservoir. Le terme de *courbe de stock* pourrait être employé pour qualifier le cycle interannuel moyen des stocks simulés du réservoir.

6.5.2.2 Critères fiabilité-résilience-vulnérabilité (ou critères RRV)

La fiabilité est un concept largement utilisé dans l'analyse et la conception des systèmes de ressources en eau depuis plus d'un siècle (Jain, 2010). La fiabilité d'un système peut être définie comme la probabilité pour qu'aucune défaillance du système ne soit observée pendant l'horizon de gestion (Hashimoto et al., 1982; McMahon et al., 2006). C'est une mesure comprise entre 0 et 1.

La résilience indique la capacité d'un système de revenir à un état de fonctionnement satisfaisant après une défaillance ou un échec : c'est l'inverse de la durée moyenne d'un épisode de défaillance. Elle est exprimée par unité de temps⁻¹. Une résilience égale à 1 indique soit que le système n'a pas été défaillant, soit que le système n'est jamais défaillant sur une période supérieure à un pas de temps (McMahon et al., 2006).

La vulnérabilité indique le degré de sévérité de la défaillance c'est-à-dire le dommage vraisemblable d'une défaillance (Moy et al., 1986; Kjeldsen & Rosbjerg, 2001). C'est le déficit maximum moyen des épisodes de défaillance (Hashimoto et al., 1982; McMahon et al., 2006).

Dans cette étude, nous utiliserons les critères RRV définis par Hashimoto et al. (1982). Les expressions de ces critères se trouvent en **Annexe 6.D**.

6.6 Analyse des résultats de l'application de l'AG : cas sans le réservoir souterrain

6.6.1 Evolution des fonctions critères

L'outil de gestion développé et nommé « OPTIWAM » (*OPTimization Irrigation Water Management*) a été mis en œuvre sur l'hydro-système de Boura pour déterminer la meilleure combinaison des variables de décision (fournitures d'eau à partir de la source de surface) qui conduirait le système à son optimum. L'horizon de gestion correspond à un cycle hydrologique. Le pas de temps de gestion est mensuel. Ainsi, le nombre de variables décisionnelles du prototype du système à optimiser est égal à 12.

Nous avons attribué à tous les objectifs le même coefficient de pondération. L'analyse de sensibilité s'est faite sur les paramètres de l'AG (taille de la population, probabilité de croisement, probabilité de mutation et nombre de générations). Les premiers tests ont convergé avec les paramètres de l'AG du **Tableau 6 - 2** et un pourcentage d'élites de 20% à conserver dans la génération suivante.

Tableau 6 - 2 : Synthèse des paramètres et opérateurs de l'AG.

AG	Désignation	Attribution
Paramètres	Nombre maximum de générations	1000
	Taille de la population	30
	Probabilité de croisement	0,8
	Probabilité de mutation	0,03
Opérateurs	Méthode de codage	Codage réel
	Sélection	Sélection par tournoi binaire
	Croisement	Arithmétique
	Mutation	Aléatoire
	Stratégie d'évolution	Elitisme

La tendance à la convergence de l'AG avec les paramètres mentionnés au **Tableau 6 - 2** est montrée à la **Figure 6 - 3**. La meilleure valeur de la fonction d'adaptation est améliorée par l'AG jusqu'à l'obtention de sa valeur optimale (0,654). Comme on peut l'observer sur la **Figure 6 - 3**, 95% du maximum de la valeur de fitness est atteint lorsque le nombre de générations est inférieur à 100. L'objectif relatif à la satisfaction de la demande a été rapidement atteint tandis que ceux relatifs à la productivité physique de l'eau et à la garantie de la réserve écologique sont atteints avec plus de difficultés.

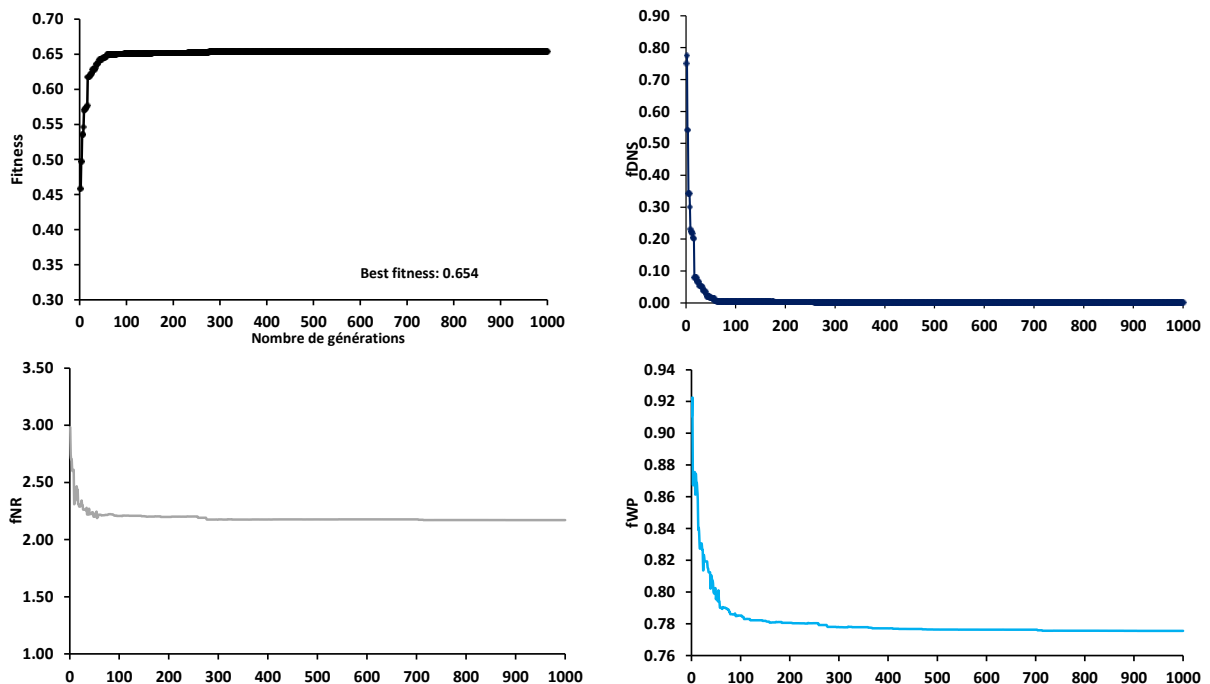


Figure 6 - 3 : Evolution de la fonction d'adaptation et des fonctions objectifs en fonction du nombre de générations.

6.6.2 Fournitures optimales pour la satisfaction des demandes en eau

La répartition temporelle des fournitures d'eau correspondantes à la valeur optimale de la fonction d'adaptation est représentée à la **Figure 6 - 4**. Globalement, les demandes en eau

exprimées sur l'horizon de gestion sont satisfaites pour des entrées déterministes. Les fournitures d'eau maximales sont compatibles aux fortes exigences en eau entre février et avril.

Le **Tableau 6 - 3** montre les écarts relatifs mensuels " $ER = 100 \cdot (F_{opt} - D) / D$ " (%) entre les demandes en eau (D) et les fournitures optimales (F_{opt}). La valeur minimale de ces erreurs de l'ordre de -5,4% est observée en mai 2013. On observe également que les fournitures d'eau optimales au site de demande D(1) sont supérieures aux demandes au début et à la fin de la période de gestion avec un écart relatif maximum de l'ordre de +6,5% en octobre 2013. Une période critique est observée entre les mois de mars et mai. Sachant que les erreurs acceptables sur les instruments de mesure des débits des ouvrages hydrauliques sont de l'ordre de $\pm 2\%$ (USBR & USDA, 2001), l'outil de gestion « OPTIWAM » pourrait être considéré comme efficient et robuste en termes de satisfaction de la demande en eau agricole.

Tableau 6 - 3 : Ecarts relatifs mensuels entre les volumes des demandes en eau et des fournitures optimales.

Mois	nov.-12	déc.-12	janv.-13	févr.-13	mars-13	avr.-13	mai-13	juin-13	juil.-13	août-13	sept.-13	oct.-13
ER (%)	5,1	3,7	0,0	0,0	-1,8	-3,9	-5,4	0,0	0,7	0,0	0,0	6,5

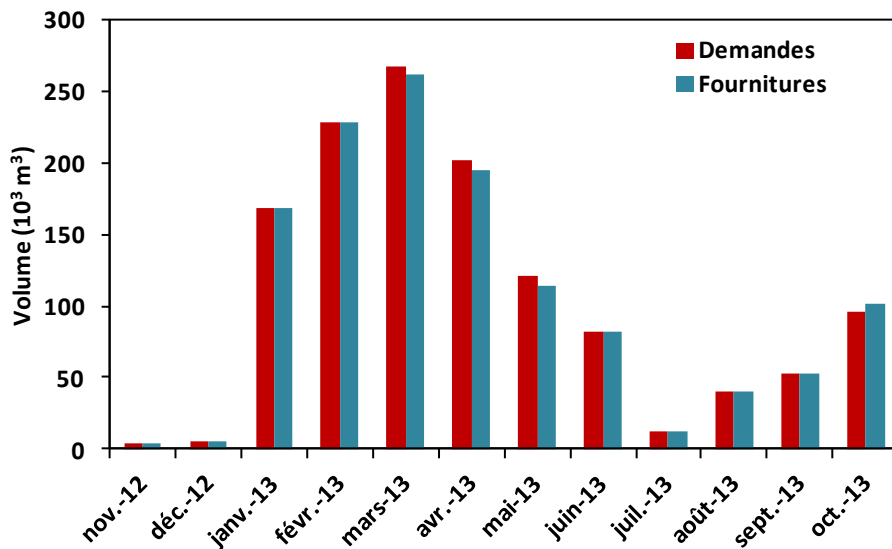


Figure 6 - 4 : Evolution mensuelle des fournitures d'eau optimales et des demandes en eau.

6.6.3 Evolution de la courbe de stock optimal sans la source souterraine

La **Figure 6 - 5** illustre le fonctionnement optimal du réservoir de Boura. On peut observer que la stratégie optimale de gestion permet d'avoir des volumes simulés du réservoir plus importants comparés à ceux issus des observations. Ainsi, on pourrait accroître le volume minimal en fin de saison sèche de l'ordre de 0,43 Mm³ et avoir un volume d'eau

supplémentaire d'environ $0,60 \text{ Mm}^3$ dans le réservoir de surface à la fin de la période de gestion.

Le volume du réservoir de surface subit une décroissance continue entre novembre et juillet. Cette diminution des stocks d'eau sur la période avec très peu d'apports est due aux prélèvements (fournitures d'eau) et aux pertes par évaporation nette et par infiltration. Par contre l'augmentation de juillet à octobre est principalement due aux apports assez significatifs dans le réservoir.

Aucune violation des limites acceptables de la capacité du réservoir n'a été observée sur l'horizon de gestion. Cela indique que, avec les quantités d'eau fournies, la gestion optimale de la source d'approvisionnement en eau est atteinte. De cette façon, avec la connaissance du volume initial du réservoir, les fournitures d'eau optimales peuvent être connues.

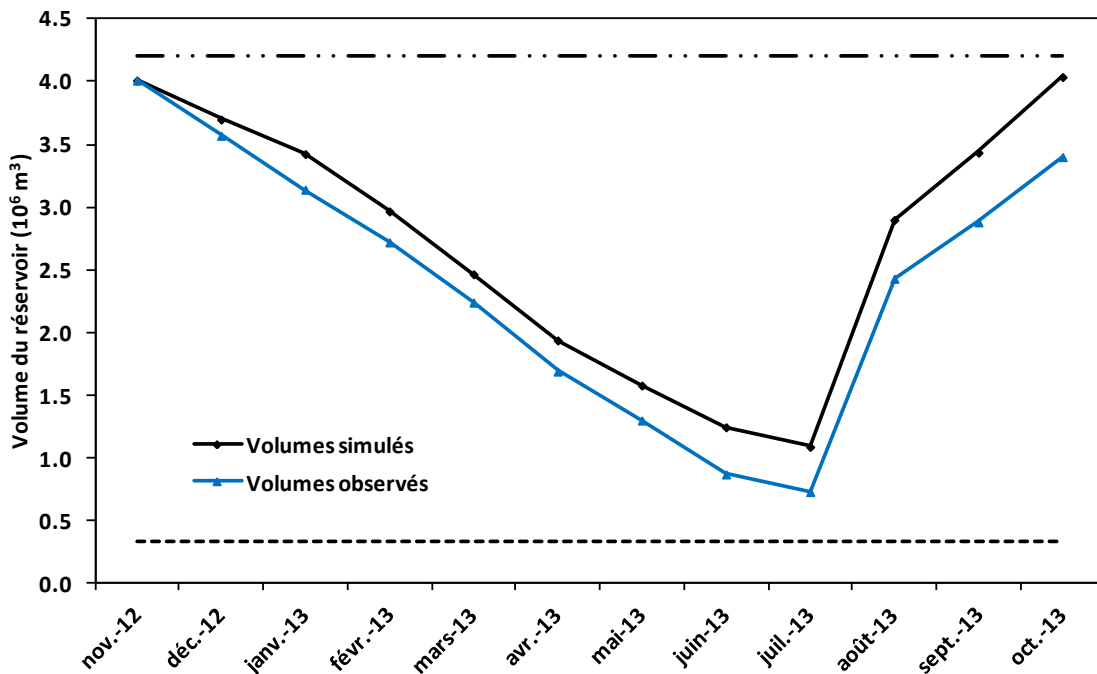


Figure 6 - 5 : Comparaison des courbes des volumes stockés observés et ceux issus de l'optimisation du système.

6.7 Evaluation de la performance du modèle de gestion

En plus de la situation actuelle (scénario Normale), l'outil de gestion a été implémenté pour trois autres scénarios du volume initial du réservoir. Ces scénarios correspondent aux années Humide, Sèche et Très Sèche avec respectivement pour volume initial V_{\max} , 75% de V_{\max} et 50% de V_{\max} (où $V_{\max} = 4,2 \text{ Mm}^3$).

Les performances de la solution optimale pour chaque scénario sont présentées dans le **Tableau 6 - 4**. On peut observer une diminution de la valeur de la fitness du scénario Humide

vers le scénario Très Sèche. Il en est de même des extrêmes des volumes simulés. La ligne grise correspondante au scénario dit pessimiste (stockage initial très faible) montre qu'il sera difficile de satisfaire les demandes agricoles et de garantir une réserve écologique. Lorsque les scénarios Humide, Normale et Sèche sont observés, des solutions optimales peuvent être identifiées par « OPTIWAM » pour atteindre presque tous les objectifs considérés tout en respectant les contraintes.

Tableau 6 - 4 : Performances des solutions optimales pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche).

Scénarios	Fitness	F_{DNS}	F_{NR}	F_{WP}	$V_{min}^{sim}(Mm^3)$	$V_{max}^{sim}(Mm^3)$
Humide	0,6561	1,95E-02	1,8966	0,7822	1,22	4,17
Normale	0,6544	1,38E-02	2,1715	0,7756	1,09	4,04
Sèche	0,6172	1,49E-02	3,6913	0,7819	0,55	3,48
Très Sèche	0,5334	12,14E-02	9,1936	0,9198	0,08	3,02

Comme observé à la **Figure 6 - 6**, les trajectoires des volumes du réservoir sur la période de gestion dépendent fortement de l'état initial (volume au début de la période de gestion). Plus le volume initial est élevé, plus les volumes stockés dans le réservoir sur la période de gestion sont importants. Des violations de la capacité morte du réservoir sont observées entre mai et juillet pour le scénario Très Sèche. Pour les autres scénarios, aucune violation des limites acceptables du stockage n'est observée. De même, le test statistique de Mann-Whitney permet de relever que les différences entre les trajectoires des stocks de ces scénarios et celle issue des observations ne sont pas significatives au seuil de significativité de 5% (p-value > 0.05). Par contre, pour le scénario Très Sèche, la différence entre les trajectoires simulée et observée est significative (p-value = 0,02 < 0,05).

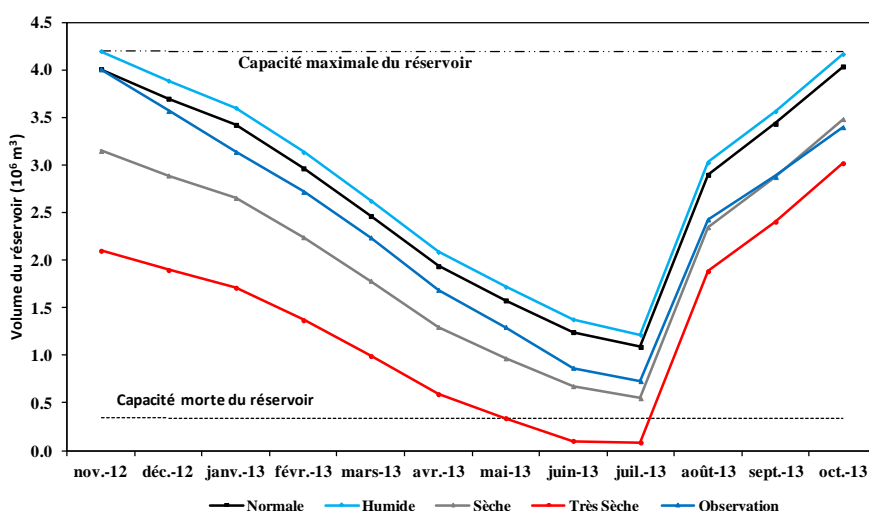


Figure 6 - 6 : Evolution des stocks d'eau pour différentes valeurs du volume initial du réservoir : cas sans aquifère.

La fiabilité du système relative aux limites admissibles de stockage du réservoir pour les scénarios Humide, Normale, Sèche et Très Sèche est respectivement 100%, 100%, 100% et 75%. Les critères de performance du système relatifs à la satisfaction des demandes en eau d'irrigation pour les scénarios considérés sont regroupés dans le **Tableau 6 - 5**. On observe que pour le scénario Très Sèche, les critères RRV sont globalement moins satisfaisants. Cependant, les scénarios Humide, Normale et Sèche ont des valeurs de critères presque équivalentes. Le système sera moins fiable et plus vulnérable lorsqu'on se retrouverait dans une situation très déficitaire en stock d'eau disponible au début de la période de gestion.

Tableau 6 - 5: Critères RRV relatifs à la satisfaction des demandes d'irrigation pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche) : cas sans aquifère.

Scénarios	Fiabilité (%)	Résilience (mois ⁻¹)	Déficit moyen (m ³)
Humide	75	0,33	5190
Normale	75	0,33	6175
Sèche	75	0,33	6430
Très sèche	42	0,14	34920

Les fournitures d'eau optimales issues des différents scénarios Humide, Sèche et Très Sèche sont présentées à la **Figure 6 - 7**. Ce graphique souligne qu'il serait difficile de satisfaire les demandes en eau de janvier à juillet dans les conditions d'utilisation actuelle pour le scénario Très Sèche. On constate également que pour ce scénario alarmant (stockage initial très faible), aucune fourniture n'est effectuée au niveau du réservoir de surface pendant les mois de juin et juillet.

Les déficits en eau observés durant toute la campagne de contre-saison pour le scénario Très Sèche auraient certainement des conséquences importantes sur les rendements des cultures. De même, le riz pluvial dont le repiquage se fait généralement en juin sera aussi confronté au problème de déficit en eau. Cette situation pourrait d'une part mettre en péril l'autosuffisance alimentaire et la sécurité alimentaire des populations locales et d'autre part engendrer une augmentation de façon significative des prix des principales denrées alimentaires de base. Ainsi, pour limiter les dégâts liés aux pénuries d'eau agricole et surtout sécuriser la production agricole, une solution alternative serait de considérer dans le domaine de gestion les eaux souterraines comme des sources d'approvisionnement pour l'irrigation.

D'ailleurs, à Boura en 2006, dans le cadre de l'intensification de la production agricole au Burkina Faso, une extension du périmètre d'environ 15 ha en aval du barrage de Boura avait intégré cette alternative d'exploitation des eaux souterraines. Malgré que, cette zone ne soit pas fonctionnelle, les ouvrages de mobilisation de l'eau prévus sont des forages manuels.

C'est dans cette optique que nous proposons une amélioration de l'outil de gestion développé en supposant que les fournitures en eau pourraient se faire aussi à partir des aquifères.

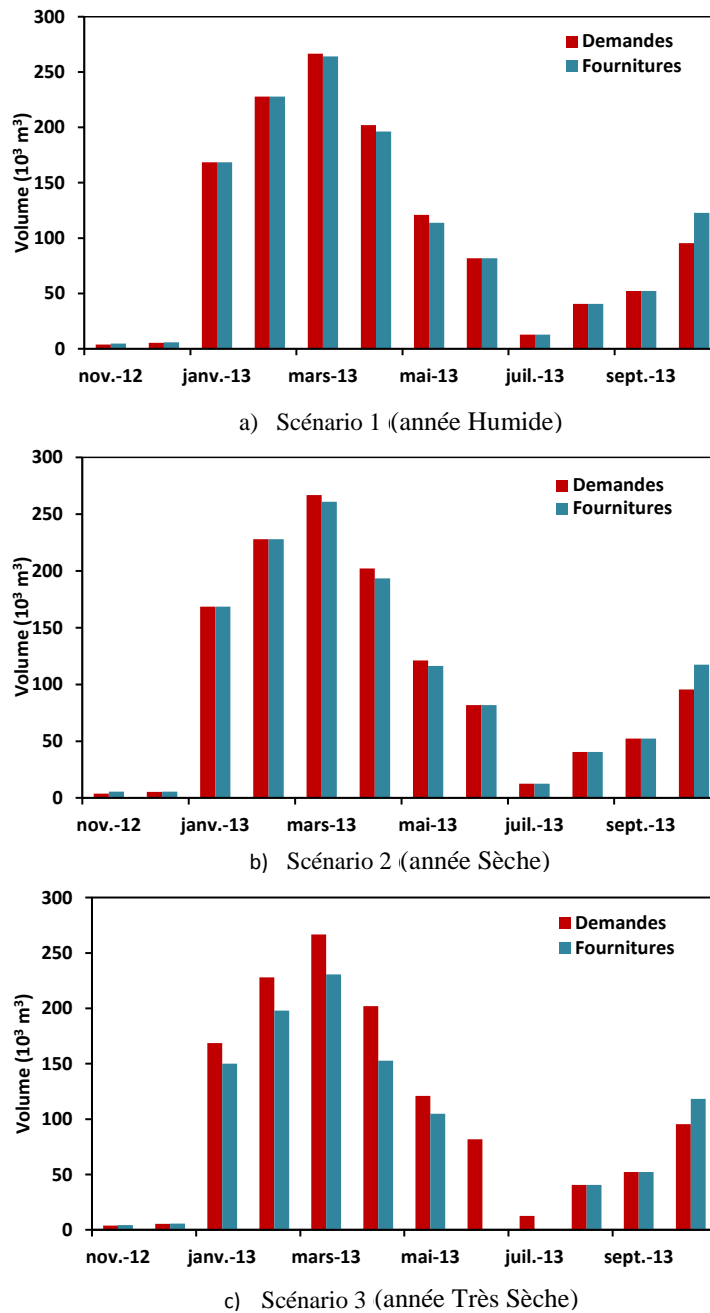


Figure 6 - 7: Evolution mensuelle des demandes en eau et des fournitures en eau optimales calculées par l'outil OPTIWAM sans l'aquifère pour des scénarios correspondants à différents niveaux du stockage initial du réservoir.

6.8 Stratégie de la gestion optimale avec les eaux souterraines comme sources alternatives

Dans le cadre d'un fonctionnement durable du réservoir de Boura, et dans une perspective de développement de l'environnement et de préservation de l'écosystème en aval du barrage de Boura, une option de gestion de l'eau en prenant les eaux souterraines comme sources alternatives pourrait être envisagée. D'ailleurs, les volumes infiltrés du réservoir et la

percolation au niveau des parcelles permettent de rehausser le niveau de l'aquifère (existence d'une mare d'eau permanente en aval du barrage de Boura). Ces volumes d'eau ne sont pas totalement perdus comme les volumes évaporés du réservoir. Ils peuvent être récupérés par pompage pour les activités agricoles autour du réservoir.

Ainsi, dans la nouvelle formulation du problème de gestion optimale de l'eau, en plus des trois objectifs précédemment relevés, nous intégrerons deux objectifs supplémentaires notamment :

- *Maintenir le niveau de la nappe superficielle constant afin de protéger l'écosystème en aval du barrage contre les problèmes de salinité et d'hydromorphie des sols (quatrième objectif);*
- *Minimiser les coûts effectifs d'approvisionnement en eau à partir des sources d'eau (cinquième objectif).*

Le **quatrième objectif** est de protéger l'écosystème en aval du barrage des problèmes de salinisation et d'hydromorphie des sols. Cet objectif qui a un caractère environnemental, est exprimé par la minimisation de la fonction f_{Env} qui représente l'écart quadratique entre les volumes infiltrés (au niveau des réservoirs et au niveau des parcelles à l'occasion de l'irrigation) et les fournitures d'eau à partir des aquifères.

$$f_{Env} = \left(\frac{\sum_{t=\Delta t}^T \left(\sum_{d=1}^{ND} \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t - \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} V_{i_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} i_d \times (1 - \alpha_d) \times BP_d^t \right) \right)}{\sum_{t=\Delta t}^T \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} V_{i_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} i_d \times (1 - \alpha_d) \times BP_d^t \right)} \right)^2 \quad (6.19)$$

où $V_{i_sw}^t$ est le volume infiltré du réservoir sw vers la nappe à la date t ; i_d la fraction des pertes d'eau à la parcelle par percolation ; BP_d^t le besoin en eau à la parcelle au site de demande d à la date t ; $F_{gw,d}^t$ la fourniture d'eau à partir de l'aquifère gw au site de demande d à la date t ; Ngw le nombre d'aquifères du domaine de gestion ; et α_d l'efficience de l'irrigation sur le site de demande d .

Le **cinquième objectif** est de minimiser le coût unitaire de l'eau. Cet objectif qui a un caractère économique, est exprimé par la minimisation de la fonction f_c qui représente le prix de l'eau adimensionné (Cai et al., 2003; Gartley et al., 2009).

$$f_c = \frac{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left[\sum_{gw}^{Ngw} (Pu_{gw,d} \times F_{gw,d}^t) + \sum_{sw}^{Nsw} (Pu_{sw,d} \times F_{sw,d}^t) \right]}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left[\sum_{gw}^{Ngw} F_{gw,d}^t + \sum_{sw}^{Nsw} F_{sw,d}^t \right]} \times Pu \max \quad (6.20)$$

où $Pu_{sw,d}$ est le prix unitaire de la fourniture en eau au site d à partir des sources de surface sw ; $Pu_{gw,d}$ le prix unitaire de la fourniture en eau au site d à partir des aquifères gw ; et $Pu \max$ le prix unitaire maximal de la fourniture en eau à partir des sources dans le domaine de gestion.

Le coût total de la production agricole est subdivisé en deux parties : les coûts non liés à l'irrigation et les coûts liés à l'eau. Ces derniers dépendent des sources d'approvisionnement. Les coûts pour l'utilisation des eaux souterraines par exemple intègrent les coûts fixes liés à la mise en place des puits ou forages (construction des puits et achat des motopompes), les coûts variables liés au fonctionnement des motopompes (achat du gasoil ou énergie électrique, maintenance et entretien).

La prise en compte des eaux souterraines comme sources d'approvisionnement nous oblige à réécrire les expressions mathématiques du premier objectif (f_{DNS}) et du troisième objectif (f_{WP}) en intégrant la desserte à partir des aquifères (cf. **Annexe 6.E.**).

Ainsi, le problème d'optimisation de la gestion du réservoir de Boura peut être redéfini comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } (f_{DNS}^*, f_{NR}, f_{WP}^*, f_{Env}, f_c) \\ \quad \quad \quad F_{se,d}^t \\ \text{tel que} \\ V_{\min se} \leq V_{se}^t \leq V_{\max se} \quad \forall d, \forall t, \forall se \in \{sw, gw\} \quad (6.21) \\ 0 \leq F_{se,d}^t \leq F_{\max se,d} \\ V_{se}^t = V_{se}^{t-\Delta t} + I_{se}^t - O_{se}^t \\ V_{se}^0 = V_{ini_se} \end{array} \right.$$

Le prototype du nouveau système modélisé présenté à la **Figure 6 - 8** comprend en plus de tous les objets du prototype définis à la section 6.3, une liaison de transmission pour la

desserte du site de demande à partir de l'aquifère avec pour capacité maximale de transmission $F_{\max}GW(1,1)$.

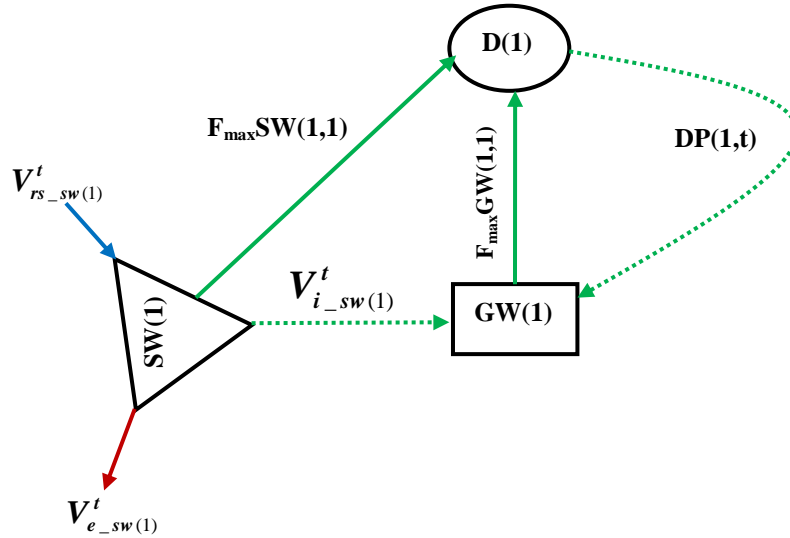


Figure 6 - 8: Schéma conceptuel du système modélisé avec l'aquifère comme source d'approvisionnement.

Pour le prototype ci-dessus, on a 24 variables de décision ($ND = 1$, $N_{sw} = 1$, $Ngw = 1$, $T = 12$ et $\Delta t = 1$).

6.9 Analyse des résultats de l'application de l'AG : prise en compte d'un réservoir souterrain

La meilleure valeur de la fonction d'adaptation avec 5 objectifs est améliorée par l'AG jusqu'à l'obtention de sa valeur optimale égale à 0,770 (cf. **Annexe 6.F.**). En termes de valeur optimale de la « fitness », nous pouvons dire que la performance de l'outil de gestion avec les eaux souterraines comme sources alternatives est améliorée de l'ordre de 18% comparée à la « fitness » optimale sans aquifère (0,654). Les objectifs relatifs à la satisfaction de la demande et à l'équilibre de l'aquifère ont été rapidement atteints tandis que ceux relatifs à la productivité de l'eau et à la réduction du coût unitaire sont atteints avec plus de difficultés (cf. **Annexe 6.F.**).

6.9.1 Evolution de la courbe optimale de stock avec l'aquifère comme source alternative

La **Figure 6 - 9** illustre le fonctionnement optimal du réservoir de Boura dans le domaine de gestion avec ou sans l'aquifère comme une source d'approvisionnement. La courbe des volumes stockés qui intègre la stratégie de gestion avec l'exploitation des eaux souterraines se trouve au-dessus de celle qui ne tient pas compte de l'aquifère. On peut observer que, cette nouvelle stratégie de gestion permet d'avoir des stocks d'eau relativement importants dans le réservoir de surface sur l'horizon de gestion. De ce fait, à la fin de la période de gestion, un

volume d'eau supplémentaire d'environ $0,75 \text{ Mm}^3$ pourrait être conservé dans le réservoir de surface par rapport aux observations et d'environ $0,11 \text{ Mm}^3$ par rapport à la situation optimisée sans aquifère.

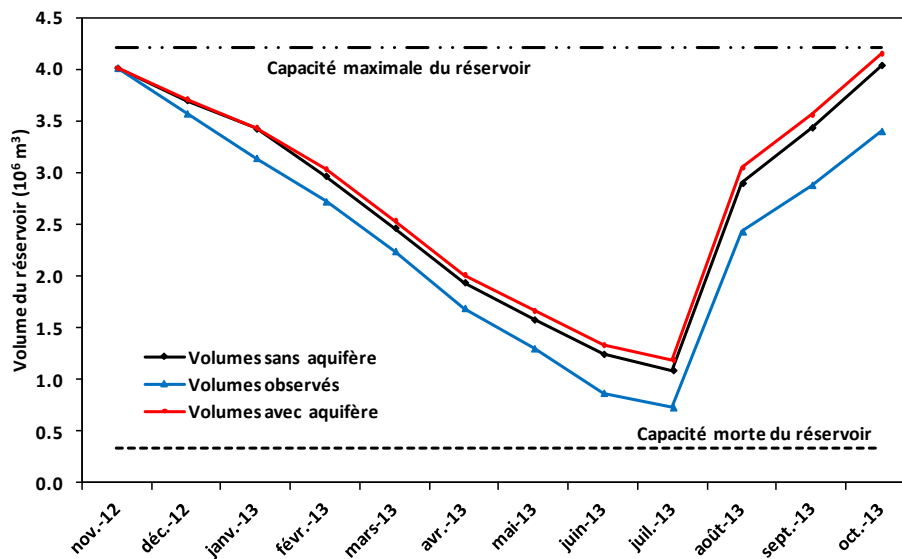


Figure 6 - 9 : Comparaison des courbes des volumes stockés observés et ceux issus de l'optimisation du système avec ou sans aquifère.

Aucune violation des limites acceptables de la capacité du réservoir n'a été observée sur l'horizon de gestion. Cela indique que, avec les quantités d'eau fournies, la gestion optimale des sources d'approvisionnement en eau est atteinte.

6.9.2 Evaluation de la performance du modèle de gestion avec l'aquifère comme source alternative

Nous avons réévalué les scénarios élaborés à la section 6.6 sous le modèle de gestion avec l'aquifère comme une source d'approvisionnement. Comme le montre la **Figure 6 - 10**, et contrairement aux courbes du réservoir sans aquifère (**Figure 6 - 6**), une violation du stock maximum du réservoir est observée en octobre pour le scénario Humide. Des violations de la capacité morte du réservoir sont observées entre mai et juillet pour le scénario Très Sèche. Le stock minimal atteint en juillet est relevé de 28,7% par rapport à celui observé dans le cas de l'optimisation sans l'aquifère. L'exploitation des eaux souterraines a permis d'accroître les stocks d'eau du réservoir.

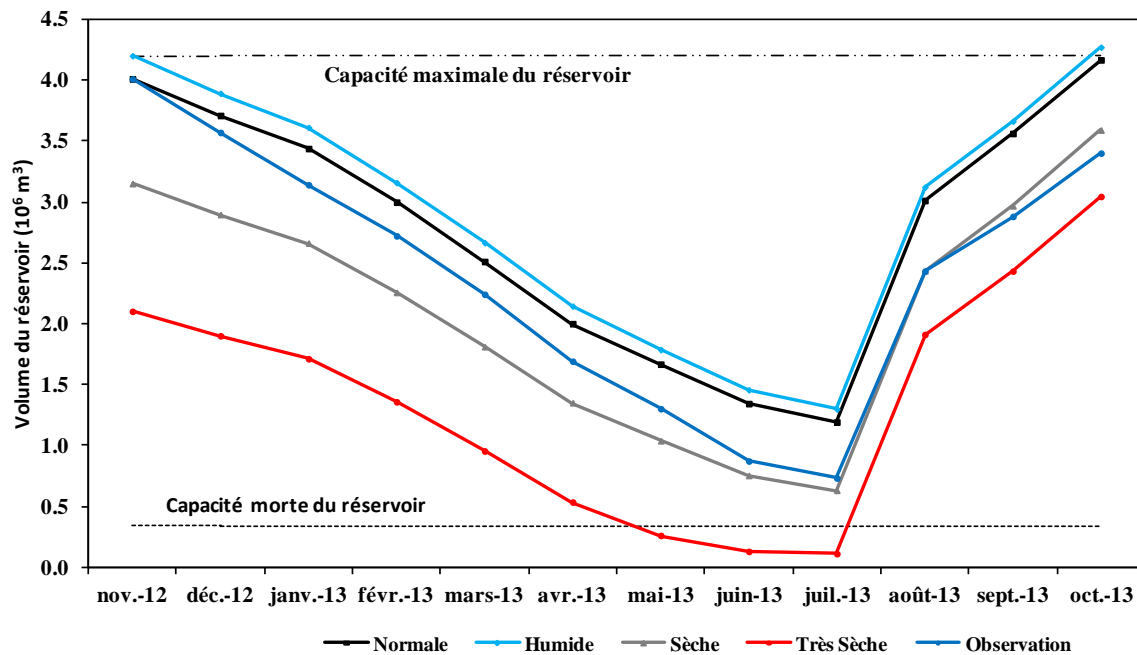


Figure 6 - 10 : Evolution des stocks d'eau pour différentes valeurs du volume initial du réservoir : cas avec l'aquifère.

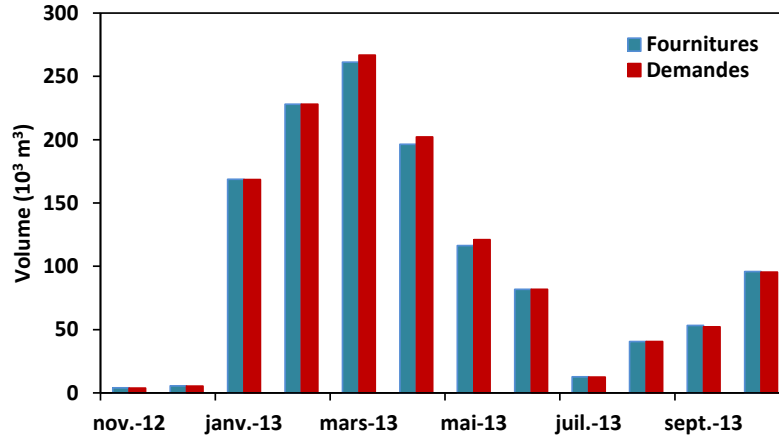
La fiabilité du système relative aux limites admissibles de stockage du réservoir pour les scénarios Humide, Normale, Sèche et Très Sèche est respectivement 92%, 100%, 100% et 75%. Les critères de performance du système relatifs à la satisfaction des demandes en eau d'irrigation pour les scénarios considérés sont regroupés dans le **Tableau 6 - 6**. On observe que pour le scénario Très Sèche, les critères RRV sont globalement moins satisfaisants. Ces critères sont légèrement améliorés comparés à ceux obtenus avec l'outil de gestion sans l'aquifère.

Tableau 6 - 6 : Critères RRV relatifs à la satisfaction des demandes d'irrigation pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche) : cas avec aquifère.

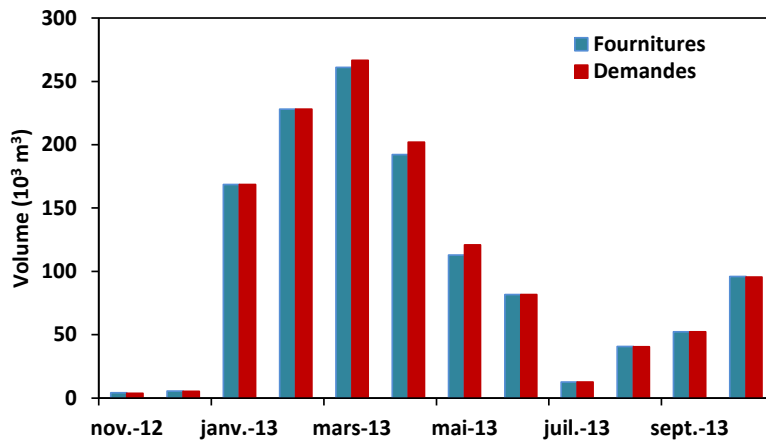
Scénarios	Fiabilité (%)	Résilience (mois ⁻¹)	Déficit moyen (m ³)
Humide	75	0,33	5293
Normale	75	0,33	7210
Sèche	75	0,33	7820
Très sèche	50	0,17	26590

Les fournitures d'eau totales optimales correspondantes aux scénarios Humide, Sèche et Très Sèche sont présentées à la **Figure 6 - 11**. Pour les scénarios Humide et Sèche, les demandes en eau seront globalement satisfaites. Par contre, le graphique montre qu'il serait difficile de satisfaire les demandes en eau surtout en mai et juin dans les conditions d'utilisation actuelle pour le scénario Très Sèche. On peut relever une amélioration de la couverture des demandes en eau durant les mois de janvier, février, juin et juillet par rapport aux sorties de l'outil de

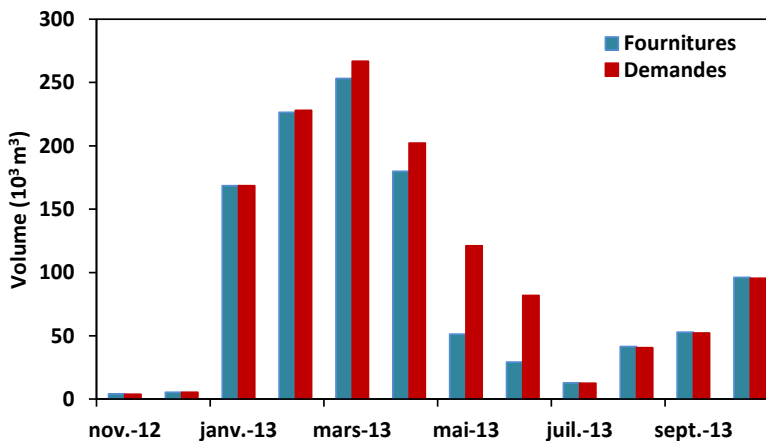
gestion sans l'aquifère (**Figure 6 - 7**). Ainsi, les eaux souterraines comme sources alternatives dans le domaine de gestion, seront d'une utilité importante dans l'amélioration de la couverture des demandes en eau agricoles surtout dans la situation de déficit du remplissage chronique du réservoir de surface observée au début de la période de gestion.



a) Scénario 1 (année Humide)



b) Scénario 2 (année Sèche)



c) Scénario 3 (année Très Sèche)

Figure 6 - 11 : Evolution mensuelle des demandes en eau et des fournitures en eau optimales calculées par l'outil OPTIWAM avec l'aquifère pour des scénarios correspondants à différents niveaux du stockage initial du réservoir.

Cette étude essaie de combiner la modélisation des processus hydrauliques, agronomiques et environnementaux du système réservoir de surface-aquifère et d'optimiser sa gestion. L'approche proposée intègre les données issues du suivi hydrologique du système modélisé.

L'outil de gestion (gestion sans aquifère et gestion avec aquifère) proposé constitue une première étape. Des améliorations pourront être faites en termes de formulation du problème et de la méthodologie de résolution. La résolution multi-objectif du problème est une option prometteuse conduisant à plus de souplesse dans la prise de décision. Les précisions sur ces données d'entrée de l'outil d'optimisation développé sont nécessaires pour garantir la meilleure qualité des résultats.

Conclusion partielle du chapitre 6

Le but de ce chapitre était de développer et de tester un outil d'optimisation de la gestion de l'eau d'un prototype comportant dans un premier temps une source de surface seule et dans un second temps une source de surface couplée à un aquifère comme sources d'approvisionnement. La formulation des problèmes multi-objectif proposés intègre trois ou cinq objectifs parmi lesquels la satisfaction de la demande en eau, la réserve écologique, la productivité de l'eau, l'équilibre de l'aquifère, et la réduction du coût unitaire de l'eau. Les contraintes hydrauliques et de l'équation de continuité sont essentiellement respectées. Une approche basée sur un modèle AG déterministe à codage réel a été utilisée pour l'optimisation des fournitures en eau à partir des différentes sources.

Nos résultats ont démontré la capacité de l'outil de gestion à identifier les solutions optimales et son efficacité de calcul en termes de temps d'exécution. Ainsi, les fournitures en eau optimales sont très proches des demandes d'irrigation dans la situation actuelle. Cependant, dans les conditions fortement déficitaires à l'état initial (volume initial du réservoir de surface très faible), il serait difficile de satisfaire les demandes d'irrigation en considérant uniquement le réservoir de surface comme source d'approvisionnement (cas de la gestion sans aquifère). Nos résultats ont également montré que la prise en compte dans le domaine de gestion de l'aquifère comme une source d'approvisionnement améliorerait la couverture des demandes en eau dans les situations alarmantes du volume initial du réservoir de surface observées au début de la période de gestion.

L'outil développé peut contribuer à l'amélioration de la gestion des ressources en eau des systèmes de petits réservoirs au Burkina Faso voire Afrique.

Les trois scénarios synthétiques (Humide, Sèche et Très Sèche) des états du stock initial de la source de surface envisagés dans ce chapitre, ne peuvent être en réalité observés que dans les conditions de scénarios climatiques. De ce fait, nous allons par la suite faire des projections sur le fonctionnement du réservoir de Boura à partir des scénarios de changements climatiques réels. Le chapitre qui suit est consacré à l'étude des impacts potentiels du changement climatique sur le réservoir de Boura.

CHAPITRE 7 : IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RÉSERVOIR DE BOURA



Le changement climatique représente une grande menace pour la croissance et le développement durable en Afrique. Le chapitre 6 a permis de constater que dans les conditions climatiques fortement déficitaires, des violations de la capacité morte du réservoir de Boura pourront être observées. Ce chapitre a pour objectif d'explorer les effets des scénarios climatiques élaborés à partir des simulations du modèle climatique RCA4 sous les profils de concentration des gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5 en termes d'impacts plausibles sur les ressources en eau du bassin en amont du réservoir de Boura, sur les demandes en eau agricoles et sur les indices de performance du système modélisé. Une partie des résultats de ce chapitre a été acceptée pour publication dans les actes du 6^{ème} Colloque International sur les Ressources en Eau et le Développement Durable (CIRED 2015) qui devrait être tenu à Blida en Algérie.

7.1 Contexte des changements climatiques en Afrique de l'Ouest

L'une des menaces sérieuses qui pèse sur les ressources en eau aujourd'hui reste les changements climatiques. Ces changements climatiques vont avoir des conséquences importantes sur les disponibilités locales des ressources en eau, ainsi que leur distribution spatio-temporelle. Ils constituent donc un problème immédiat dont de nombreux pays pauvres souffrent déjà. L'Afrique de l'Ouest figure parmi les zones les plus exposées et les plus vulnérables aux effets du changement climatique. En effet, en Afrique de l'Ouest, l'agriculture est principalement pluviale. Un épisode de sécheresse d'à peine deux ou trois semaines peut avoir des conséquences catastrophiques pour de nombreux petits agriculteurs (Molden, 2010).

Selon le 5^e rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (IPCC, 2013), une augmentation probable de la température moyenne en Afrique de l'Ouest est projetée de l'ordre de 3 à 6°C à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à la période 1986-2005. Cette tendance future du réchauffement dans cette région provient des simulations des modèles climatiques globaux sous forçages radiatifs avec les nouveaux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et des aérosols. Ces nouveaux scénarios sont des profils représentatifs d'évolution de concentration des substances actives potentiellement radiatives (*scénarios RCP : Representative Concentration Pathways*). Ces scénarios, au nombre de quatre, ont été décrits par Moss et al. (2010). Il s'agit des scénarios : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 correspondant respectivement aux forçages radiatifs 2,6 W/m², 4,5 W/m²,

6,0 W/m² et 8,5 W/m² en 2100 (Clarke et al., 2007; Riahi et al., 2007, 2011; van Vuuren et al., 2007; Hijioka et al., 2008).

Dans la zone ouest africaine, l'estimation de l'influence du changement climatique sur les ressources en eau est limitée par les incertitudes significatives des simulations des modèles climatiques globaux (MCG) au regard de l'évolution future des précipitations (Kunstmann et al., 2008; Ruelland et al., 2012; Oguntunde & Abiodun, 2013; Roudier et al., 2014). Ainsi, certaines études ont inclus une étape de désagrégation (méthode de réduction d'échelle) entre les simulations des MCG et le modèle hydrologique, à travers les *méthodes statistiques* et les *méthodes dynamiques* (Boé et al., 2007; Christensen et al., 2007; Déqué, 2007; Fowler et al., 2007; Schmidli et al., 2007; Maraun et al., 2010; Quintana Seguí et al., 2010; Rummukainen, 2010). Il existe de nombreuses études sur les impacts du changement climatique sur les écoulements à l'échelle des bassins versants, mais l'impact du changement climatique sur l'irrigation a rarement été exploré (Döll, 2002; Fischer et al., 2007).

C'est dans cette optique de perturbations climatiques que nous voulons évaluer si un signal climatique pourrait être détecté sur les indices de performance du réservoir de Boura. De ce fait, l'évaluation d'éventuels changements climatiques sera fondée sur deux tendances de développement futur : un scénario d'émission « *pessimiste* » (RCP 8.5) et un scénario d'émission supposé « *optimiste* » (RCP 4.5).

7.2 Approche générale de l'étude des impacts du changement climatique

Une étude des impacts du changement climatique à l'échelle d'un bassin versant est classiquement effectuée à travers une chaîne de modélisation associant différents types de modèles (*Figure 7 - 1*).

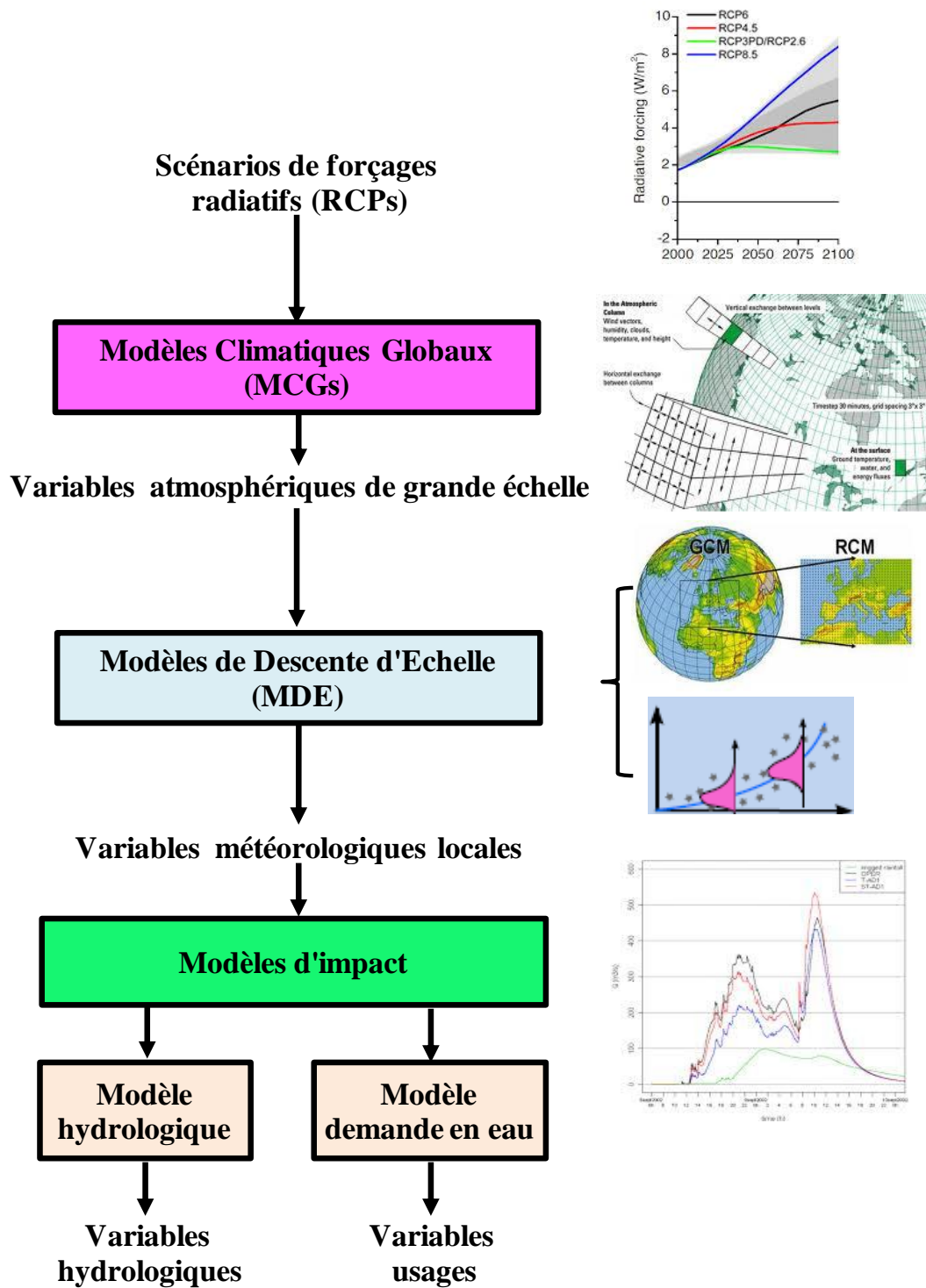


Figure 7 - 1 : Chaîne de modélisation générale d'une étude des impacts du changement climatique.

Pour cette étude, le modèle climatique régional RCA4 (Rossby Centre Atmosphere model, version 4) du SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) à un pas de résolution spatiale de $0,44^\circ$ (50 km), forcé par le modèle global MPI-ESM-LR (Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution) et tourné sur la zone de l'Afrique de l'Ouest a été utilisé (Gbobaniyi et al., 2014).

Ces données journalières simulées de précipitation et de température sont fournies par l'initiative CORDEX Africa du projet CMIP5 du programme mondial de recherche sur le climat (Giorgi et al., 2009; Jones et al., 2011; Nikulin et al., 2012; Hernandez-diaz et al., 2013). Elles couvrent deux périodes : 1950-2005 (données historiques) et 2006-2100 (données scénarios).

L'application de la méthode statistique de segmentation de Hubert sur les cumuls annuels des pluies des données scénarios ne permet pas de détecter des périodes caractéristiques homogènes de fort changement de la moyenne dans les séries. Cependant, la **Figure 7 - 2** des écarts-types glissants sur une fenêtre de 30 ans permet de distinguer trois périodes de variabilités contrastées : moyenne (avant 2038), faible (2039-2065) et forte (après 2066). Pour cela, nous avons choisi d'évaluer les impacts du changement climatique sur quatre périodes spécifiques : une période de référence 1971-2000, et trois périodes futures 2011-2040 (horizon 2020 : variabilité moyenne), 2041-2070 (horizon 2050 : Faible variabilité) et 2071-2100 (horizon 2080 : Forte variabilité). Ces périodes correspondent aux fenêtres de 30 ans sur lesquelles les données climatiques sont simulées (Giorgi et al., 2009).

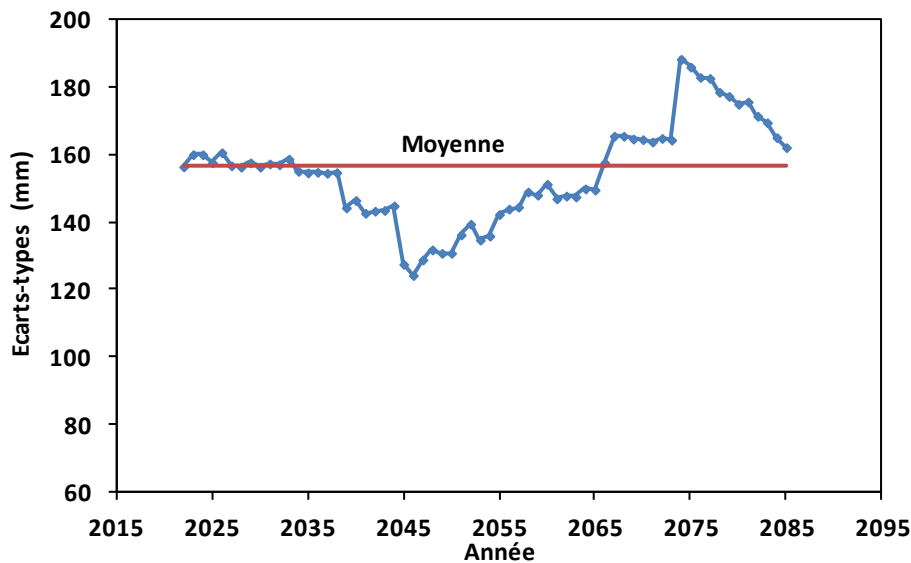


Figure 7 - 2 : Evolution des écarts-types glissants sur une fenêtre de 30 ans et de la moyenne des écarts-types de la série des pluies annuelles simulées par le modèle RCA4 sous le scénario RCP4.5 sur la période 2006 à 2100.

La méthodologie adoptée pour la suite de cette étude est présentée à la **Figure 7 - 3**. Tout d'abord, les sorties du modèle régional RCA4 sont débiaisées (approche quantile-quantile pour les précipitations et méthode des deltas pour les températures). Les sous-ensembles de données à biais corrigés sont appliqués en entrée du modèle hydrologique (GR4J) et du modèle d'estimation des demandes en eau agricoles (cf. chapitre 5) pour évaluer les apports du bassin versant du réservoir de Boura et les besoins en eau d'irrigation sous climat futur.

Ces scénarios hydrologiques et de demandes en eau sont appliqués en entrée du modèle de simulation (WEAP) pour étudier les impacts potentiels du changement et de la variabilité climatique sur les performances du réservoir de Boura.

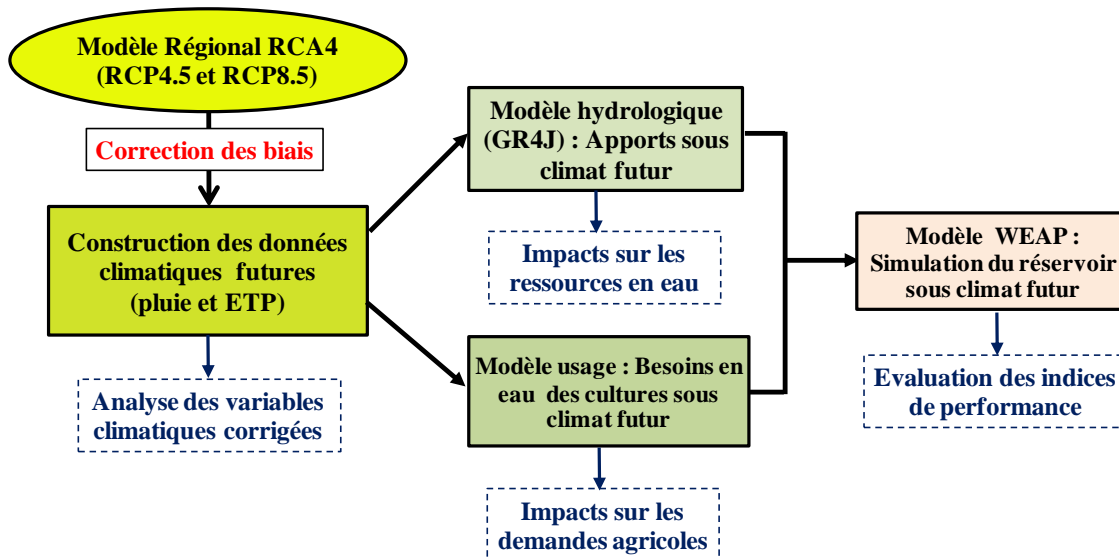


Figure 7 - 3 : Méthodologie détaillée de l'étude d'impact potentiel du changement climatique sur le réservoir de Boura.

7.3 Mise en évidence et correction des biais des données du modèle régional RCA4

7.3.1 Mise en évidence des biais

Les biais sur les simulations du modèle climatique régional (MCR) RCA4 sont mis en évidence par comparaison des données historiques simulées aux observations de la même période à l'échelle locale. Dans ce cas, on suppose que *la donnée simulée par le MCR est la même en tout point de la maille*. Les données journalières de température des stations synoptiques du Burkina Faso (1961-2009) fournies par les services météorologiques ont été spatialisées sur l'ensemble du territoire burkinabé dans l'étude du climat au Burkina Faso (Ibrahim, 2012). Ainsi, une comparaison saisonnière et interannuelle est faite entre les données historiques simulées et les données observées sur la période de référence 1971-2000.

Pour les pluies, nous nous sommes intéressés à deux caractéristiques principales : l'intensité et la fréquence des pluies à travers les variables telles que la hauteur des pluies et le nombre de jours de pluie. La comparaison ne s'effectuera pas directement sur les données de température mais plutôt sur les données de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à cause de leur faible variabilité comparée aux précipitations (Ibrahim, 2012). Les données de l'ETP sont estimées par la formule de Hargreaves et Samani (Hargreaves & Samani, 1985) qui ne dépend que de la température donnée par l'équation (7.1). D'ailleurs, Ibrahim (2012) a montré que

cette formule permet d'estimer les valeurs d'ETP très proches de celles obtenues avec la formule de Penman-Monteith qui est plus complexe.

$$ETP_{HS} = 0,0023R_a T_{mean} + 17,8 \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (7.1)$$

R_a rayonnement au sommet de l'atmosphère ou rayonnement extraterrestre [$mm.jour^{-1}$],
 T_{max} , T_{min} , et T_{mean} maximum, minimum, et température moyenne [$^{\circ}C$].

Le modèle RCA4 sous le forçage global MPI-ESM-LR simule au moins deux fois plus de nombre moyen annuel d'évènements pluvieux observés (**Figure 7 - 4a**), et ce quel que soit le mois considéré (**Figure 7 - 4c**). Par contre, la comparaison des intensités moyennes des précipitations mensuelles montre que les intensités de pluie observées sont largement sous-estimées par le modèle RCA4 (**Figure 7 - 4e**). Une absence des précipitations entre les mois de décembre et février est observée des sorties du modèle RCA4. Le modèle RCA4 reproduit la dynamique saisonnière des précipitations de la zone climatique nord soudanienne. Le pic de précipitations apparaît en août. Le modèle simule des hauteurs de pluie très importantes en début et en fin de saison (**Figure 7 - 4d**).

La gamme des cumuls annuels des données pluviométriques observées et simulées est présentée à la **Figure 7 - 4b**. On observe une surestimation des cumuls annuels simulés par le modèle RCA4. L'application du test non paramétrique de Wilcoxon signé (Wilcoxon, 1945; Harris & Hardin, 2013) aux couples des cumuls annuels des données pluviométriques observées et simulées montre qu'il existe une différence significative entre les deux séries de données au seuil de significativité de 5% ($p\text{-value} = 10^{-5} < 0,05$).

La **Figure 7 - 4f** présente la gamme des cumuls annuels d'ETP observés et simulés. Il ressort une surestimation par le RCA4 de l'ordre de 3% en valeur moyenne. Le test de Wilcoxon signé au seuil de significativité de 5% montre qu'il existe une différence significative entre les deux séries de données ($p\text{-value} = 10^{-4} < 0,05$). Les estimations de l'ETP simulées reproduisent la variabilité saisonnière de l'ETP avec un coefficient de corrélation supérieur à 90%.

Les résultats obtenus corroborent ceux de Flato et al. (2013) qui signalent une subsistance de certains des biais des MCG au sein des MCR. Le modèle RCA4 sous le forçage global MPI-ESM-LR produit un nombre important de jours pluvieux avec beaucoup de faibles pluies et un cumul annuel élevé des précipitations. Cela explique pourquoi il est nécessaire de corriger les données simulées par les MCG ou les MCR avant leur utilisation pour les études d'impact (Wood et al., 2004; Piani et al., 2010; Sunyer et al., 2012). Ce traitement de biais est incontournable car les écarts entre les séries de données des pluies simulées et observées

peuvent donc perturber ou influencer substantiellement les simulations hydrologiques (Graham et al., 2007; Bárdossy & Pegram, 2011).

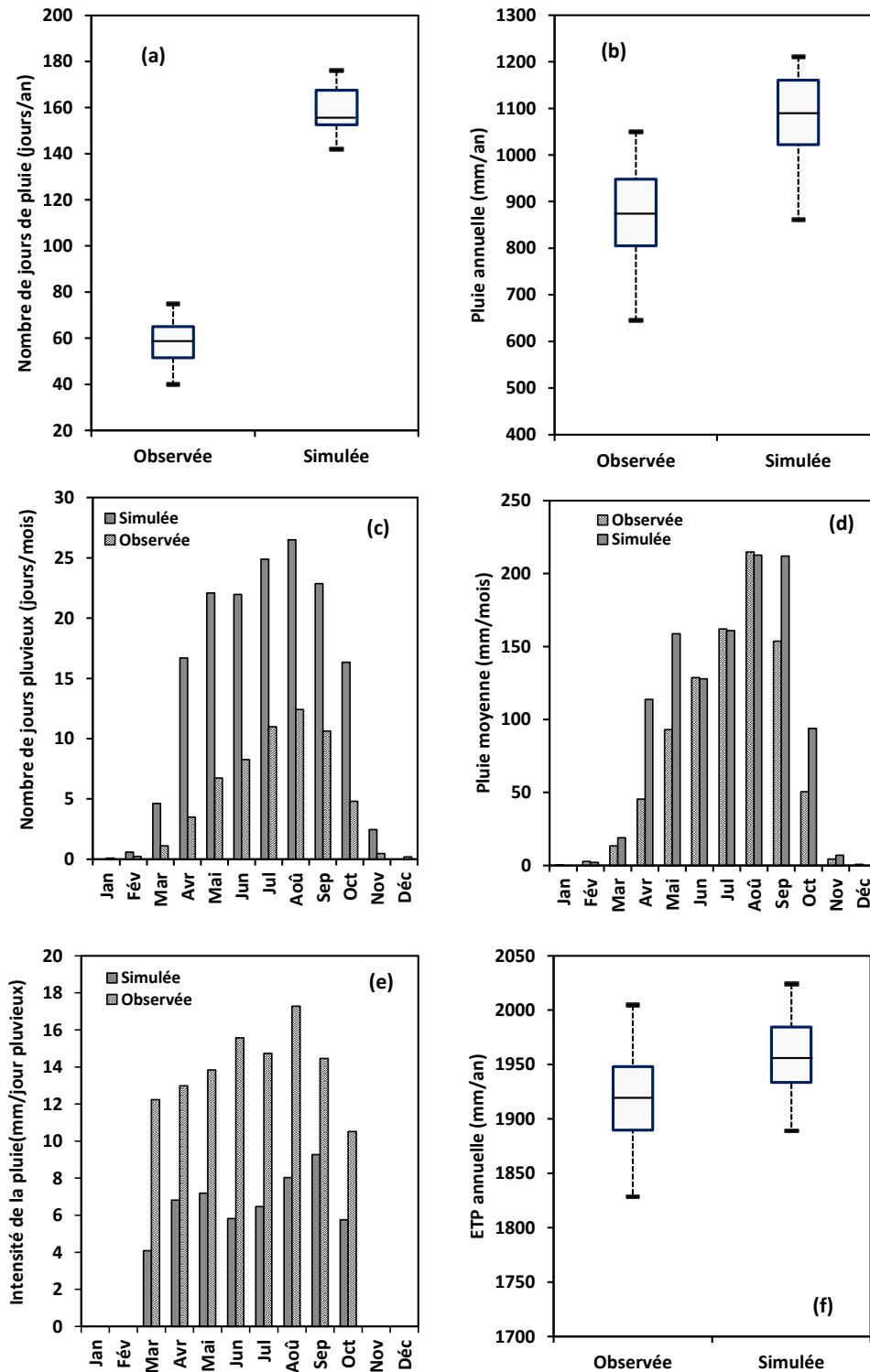


Figure 7 - 4 : Comparaison entre les caractéristiques des variables climatiques simulées et celles issues des observations à Boura sur la période 1971-2000 : (a) nombre de jours de pluie par an, (b) hauteur de pluie annuelle, (c) nombre moyen de jours pluvieux par mois, (d) hauteur moyenne de pluie par mois, (e) intensité moyenne de la pluie et (f) ETP annuelle.

7.3.2 Méthodes de correction des biais

7.3.2.1 Correction des précipitations

La méthode de correction des biais des données pluviométriques simulées vise à reproduire l'ordre de grandeur des caractéristiques des pluies observées de l'échelle journalière à l'échelle annuelle ainsi que la reproduction de la variation saisonnière de la pluie. Parmi les approches de correction des biais existantes (Boe, 2007; Déqué, 2007), la méthode statistique dite *quantile-quantile* est retenue pour cette étude. Cette méthode vise à établir une égalité entre les quantiles simulés et les quantiles observés sur la période de référence. Le choix de cette méthode de correction est guidé par les appréciations issues de nombreux travaux antérieurs (Ines & Hansen, 2006; Alam, 2011; Bárdossy & Pegram, 2011; Mishra and Herath, 2011; Ibrahim, 2012).

Cette méthode suppose que le modèle MCR est capable de prédire la variabilité du climat futur. Elle est donc appliquée pour minimiser les biais sur la fréquence et l'intensité des pluies. La correction est mise en œuvre sur des périodes du cycle annuel afin de prendre en compte la saisonnalité. Ainsi, les périodes marquées par le début de la saison pluvieuse (mars à mai), pleine saison pluvieuse (juin à août) et fin de la saison de la pluvieuse (septembre à novembre) subiront des corrections, tandis que la période de décembre à février ne sera pas corrigée en supposant que les événements pluvieux sont rares.

a) Correction de la fréquence des pluies simulées

La correction consiste à réduire le nombre d'évènements pluvieux simulés par le modèle régional surtout les évènements de faibles hauteurs de pluie. Un jour est considéré comme pluvieux si la hauteur cumulée des pluies de ce jour est supérieure à 0,1 mm. L'idéal serait de conserver le même nombre d'évènements pluvieux simulés que observés. Pour cela, les données pluviométriques journalières issues des observations et du modèle RCA4 sur la période de référence (1971-2000) sont rangées par ordre croissant, et ensuite la série des données simulées est tronquée à partir du rang dont la probabilité au non-dépassement est inférieure à la probabilité au non-dépassement correspondant à la valeur nulle des données observées. Ainsi, la fréquence des pluies simulées est corrigée en considérant toutes les hauteurs de pluie de la partie de la série enlevée comme nulles (Mishra & Herath, 2011; Ibrahim, 2012).

b) Correction de l'intensité des pluies simulées

La série tronquée des données simulées du modèle RCA4 et celle des observations du poste pluviométrique de Boura sont subdivisées en deux parties pour permettre de corriger les pluies moyennes et les pluies extrêmes. Les pluies extrêmes considérées correspondent aux

pluies de hauteurs supérieures au 95^{ème} percentile de la série. Chacune des parties de ces sous-séries sera ajustée à une distribution appropriée.

Pour la correction de l'intensité des pluies journalières simulées (moyennes et extrêmes), la *loi de distribution Gamma* (équation 7.2) a été montrée être la plus adaptée (Ines & Hansen, 2006; Piani et al., 2010; Bárdossy & Pegram, 2011; Mishra & Herath, 2011; Trambly et al., 2013). La distribution Gamma est utilisée à cause de sa capacité à représenter les *coefficients d'asymétrie et d'aplatissement* des intensités de pluie journalières (Haylock et al., 2006). L'ajustement de cette loi, nécessite l'estimation de ses deux paramètres (λ : paramètre de forme et Φ : paramètre d'échelle). La méthode d'estimation des paramètres est celle du maximum de vraisemblance (Olsson et al., 2012) à l'aide de l'outil HYFRAN⁷ (HYdrological FRequency Analysis).

$$F(x, \lambda, \Phi) = \frac{1}{\Phi^\lambda \Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\frac{x}{\Phi}} \quad (7.2)$$

Les quantiles simulés corrigés sur la période de référence (1971-2000) sont estimés à partir des équations (7.3a) et (7.3b) respectivement pour les quantiles simulés d'ordre inférieur ou égal au 95^{ème} percentile et les quantiles d'ordre supérieur au 95^{ème} percentile (Mishra & Herath, 2011; Olsson et al., 2012).

$$x_{Cor}^s(t) = F_{Obs}^{-1}(F_{CTL}(x^s(t))) \quad (7.3a)$$

$$x_{Cor,95}^s(t) = F_{Obs,95}^{-1}(F_{CTL,95}(x_{95}^s(t))) \quad (7.3b)$$

Sur les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080), les quantiles simulés corrigés sont estimés à partir des équations (7.4a) et (7.4b) respectivement pour les quantiles simulés d'ordre inférieur ou égal au 95^{ème} percentile et les quantiles d'ordre supérieur au 95^{ème} percentile (Mishra and Herath, 2011; Olsson et al., 2012).

$$x_{Cor}^{sf} = x^{sf} \times \frac{F_{Obs}^{-1}(F_{Scen}(x^{sf}))}{F_{CTL}^{-1}(F_{Scen}(x^{sf}))} \quad (7.4a)$$

$$x_{Cor,95}^{sf} = x_{95}^{sf} \times \frac{F_{Obs,95}^{-1}(F_{Scen,95}(x_{95}^{sf}))}{F_{CTL,95}^{-1}(F_{Scen,95}(x_{95}^{sf}))} \quad (7.4b)$$

⁷ http://www.inrs-eau.quebec.ca/activites/groupe/chaire_hydr/chaire9.html
<http://www.wrpllc.com/books/hyfran>

où F_{obs} , F_{CTL} et F_{Scen} ($F_{obs,95}$, $F_{CTL,95}$ et $F_{Scen,95}$) représentent respectivement les ajustements de la loi de distribution Gamma sur les données observées, les données historiques simulées (période de contrôle) et les données scénarios (horizons d'intérêt) pour les quantiles inférieurs ou égal au 95^{ème} percentile (pour les quantiles supérieurs au 95^{ème} percentile).

Dans cette démarche de correction des biais, on suppose que les transformations utilisées (fonctions de correction) pour corriger les données du modèle MCR sont stationnaires.

7.3.2.2 Correction de l'évapotranspiration potentielle

La variabilité temporelle de l'ETP journalière est moins forte que celle de la pluie journalière. De ce fait, une approche simple sera appliquée pour corriger les biais des données ETP estimées à partir des températures simulées par le MCR. La méthode de débiaisage consiste à calculer les écarts moyens mensuels entre les données mensuelles d'ETP observées et celles simulées sur la période de référence (1971-2000), puis à les ajouter aux données d'ETP issues des scénarios (Hashino et al., 2006; Lenderink et al., 2007 ; Graham et al., 2007; Andersson et al., 2011). Pour cela, le facteur de correction pour chaque mois sur la période de référence est exprimé par l'équation (7.5) :

$$\Delta_m = \bar{x}_m^{obs,ref} - \bar{x}_m^{mcr,ref} \quad (7.5)$$

Δ_m : Ecart moyen de correction pour le mois m ;

$\bar{x}_m^{obs,ref}$: ETP du mois m calculée à partir des températures observées sur la période de référence (1971-2000) et moyennée sur les 30 années de cette période ;

$\bar{x}_m^{mcr,ref}$: ETP du mois m calculée à partir des données de températures simulées par le modèle RCA4 sur la période de référence (1971-2000) et moyennée sur les 30 années de cette période .

Pour corriger les données journalières d'ETP brutes simulées, les facteurs de correction mensuels sont appliqués au pas de temps journalier en tenant compte du nombre de jours correspondant à chaque mois m . Ainsi, les données d'ETP corrigées sur les horizons d'intérêt sont obtenues à partir de l'équation (7.6) :

$$x_{a,m,j}^{scen}(cor) = x_{a,m,j}^{scen}(bru) + \frac{\Delta_m}{N_m} \quad (7.6)$$

$x_{a,m,j}^{scen}(cor)$: ETP quotidienne corrigée pour le jour j du mois m de l'année a pour le scénario RCP considéré ;

$x_{a,m,j}^{scen}(bru)$: ETP quotidienne brute pour le jour j du mois m de l'année a pour le scénario RCP considéré ;

N_m : Nombre de jours correspondant au mois m .

Cette méthode de correction suppose implicitement que la variabilité et la distribution statistique des simulations du MCR soient non-biaisées.

7.3.3 Correction des biais sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle

La **Figure 7 - 5** montre les distributions associées aux pluies journalières brutes et corrigées. On peut observer que sur la période de référence, la distribution des données pluviométriques simulées corrigées est presque similaire à celle des observations. Il y a une diminution de la fréquence associée aux faibles évènements pluvieux. Les gammes des cumuls annuels du nombre de jours pluvieux et des cumuls des précipitations des données corrigées sur la période de référence (1971-2000) sont proches de celles des observations (**Figure 7 - 6**).

Pour l'ETP, les facteurs de correction varient entre $-0,7$ mm/jour et $+0,4$ mm/jour selon le mois considéré. On observe une surestimation de l'ETP simulée durant les mois de fortes (février à avril) et de faibles (juin à septembre) valeurs d'ETP correspondant respectivement aux mois de faibles et de fortes humidités de l'air.

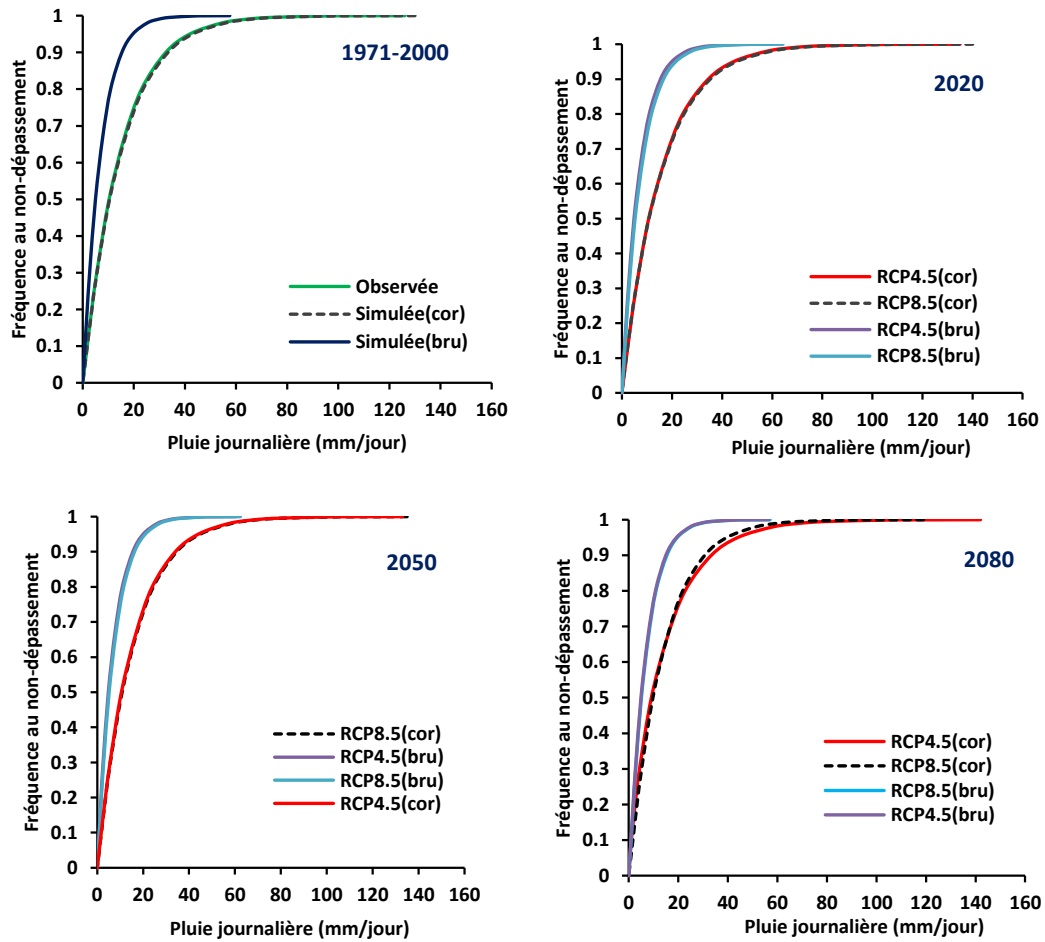


Figure 7 - 5 : Fréquences de distribution associées aux pluies journalières brutes (bru) et corrigées (cor) sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour deux scénarios RCPs.

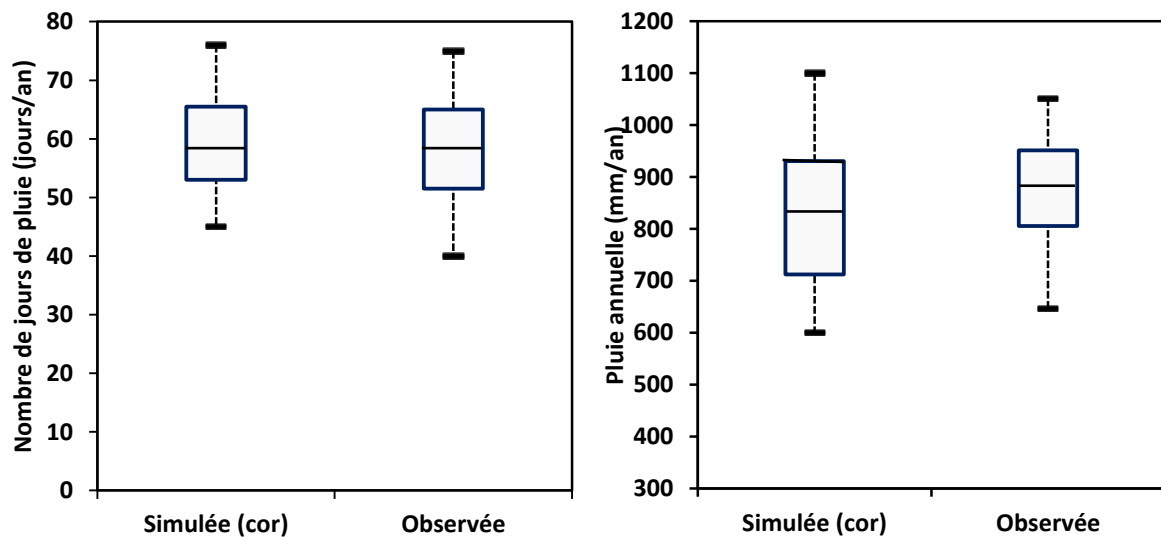


Figure 7 - 6 : Comparaison des caractéristiques des données pluviométriques observées et simulées corrigées sur la période de référence (1971-2000).

7.4 Analyse des variables climatiques corrigées

7.4.1 Evolution des précipitations

L'évaluation des précipitations pour les décennies à venir est très importante du fait de la sensibilité des modèles hydrologiques à cette variable. L'évolution des précipitations moyennes mensuelles montre que la saisonnalité des précipitations aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) est proche de celle observée quel que soit le scénario RCP. Le régime pluviométrique unimodal est bel et bien conservé. Cependant, le cumul moyen des pluies du mois d'août augmentera significativement avec une différence notable entre les deux scénarios RCP à l'horizon 2050 (*Figure 7 - 7*). Cette forte variation des précipitations pourrait engendrer des modifications importantes des crues et permettrait un remplissage rapide du réservoir.

Les analyses révèlent une augmentation des pluies moyennes annuelles corrigées sur les trois horizons d'intérêt quel que soit le scénario RCP (*Figure 7 - 8*). Pour chacun des deux scénarios RCP, l'augmentation est plus accentuée à l'horizon 2050. L'amplitude de changement des pluies moyennes annuelles corrigées comparées aux moyennes observées varie entre +1,4 et +22,5% selon le scénario RCP. Une forte dispersion est observée pour les pluies annuelles futures avec des coefficients de variation allant jusqu'à 24% (*Tableau 7 - 1*). D'ailleurs, le GIEC prévoit une augmentation des précipitations annuelles sur la zone ouest africaine de moins de 20% sur la période 2081-2100 comparée à la période 1986-2005 sous le scénario RCP8.5 (Cubasch et al., 2013). De même, les résultats des modélisations (avec le modèle CNRM-CM5) indiquent qu'il pleuvrait plus en Afrique de l'Ouest sur la période 2071-2100 comparée à la période 1970-2000 pour le scénario RCP8.5 (Guehl & Soussana, 2014). Le test de Wilcoxon signé montre qu'il n'existe pas une différence significative au seuil de significativité de 5% entre les couples de séries de données des précipitations annuelles simulées corrigées et celle des précipitations annuelles observées (p-value > 0,05) exceptée la série de données correspondant au scénario RCP8.5 à l'horizon 2050 (p-value < 0,05).

Tableau 7 - 1 : Paramètres statistiques des cumuls annuels des précipitations observées et simulées pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080).

Paramètres	Période de référence	2020		2050		2080	
		Observation	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5
Moyenne (mm)	857,1	869,5	919,1	901,8	1050,3	888,8	921,8
Variation relative (%)	-	1,4	7,2	5,2	22,5	3,7	7,5
Ecart-type (mm)	118,5	206,5	201,7	207,1	194,6	216,3	214,9
Coefficient de variation (%)	13,8	23,7	21,9	23,0	18,5	24,3	23,3

On constate que tous les mois ne seront pas affectés de la même. En effet, les gammes de variation des précipitations moyennes mensuelles corrigées pour les horizons futurs par rapport aux précipitations moyennes observées de la période 1971-2000 sont projetées de -34% à +48% pour l'ensemble des deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (*Tableau 7 - 2*).

A l'horizon 2050, sous le scénario RCP4.5, on projette une diminution jusqu'à 24% des précipitations au début et à la fin de la saison de pluie tandis que sous le scénario RCP8.5, on projette une forte augmentation pendant le mois d'août. A l'horizon 2080, sous les deux scénarios RCP, une diminution des précipitations moyennes mensuelles allant jusqu'à 19% au début de la saison pluvieuse est projetée. On note une augmentation des précipitations moyennes par rapport aux observations 1971-2000, de +22,1% (horizon 2020) à +48,4% (horizon 2050) au mois d'août. Jones et al. (2012) projettent une augmentation des précipitations aux horizons considérés par rapport à la période de référence choisie en Afrique de l'Ouest avec les sorties du modèle RCA4 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Une gamme de variation entre +20% et +50% est projetée pour les mois de juillet à septembre à l'horizon 2080 pour le scénario RCP8.5.

Tableau 7 - 2 : Taux de variations moyens mensuels (%) des précipitations pour les horizons 2020, 2050 et 2080 pour chaque scénario RCP par rapport à la moyenne de la période de référence 1971-2000.

Mois	2020		2050		2080	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Avril	46,5	14,0	-12,9	30,2	-10,7	4,9
Mai	-10,0	-14,6	2,8	8,5	-10,7	-15,7
Juin	-7,9	24,1	9,8	15,1	-9,4	-18,5
Juillet	0,6	0,7	1,1	19,2	-5,7	5,4
Août	34,2	22,1	26,4	48,4	28,6	28,8
Septembre	-34,3	-3,9	-6,7	8,1	4,2	14,8
Octobre	-17,6	-3,5	-24,2	14,0	6,3	8,6

Aich et al. (2014) ont montré une double tendance de l'évolution future des précipitations sur le bassin du Niger. Une tendance à la baisse est observée en tête du bassin du côté de l'Ouest et une tendance à la hausse à l'Est du bassin. La courbe enveloppe des sorties de 14 modèles de CMIP5 confirme cette tendance à l'augmentation des précipitations sur le bassin du Niger à la fin du XXI^{ème} siècle (2070-2099) par rapport à la période 1970-1999 pour le scénario RCP8.5. La gamme de variation des précipitations moyennes mensuelles pour cinq modèles ESMs (Earth Systems Models) se situe entre -20% et +120%. Pendant la saison sèche entre novembre et mars, aucune tendance des précipitations n'est observée. Les 5 modèles représentent la plage des précipitations pour l'ensemble des modèles de CMIP5, malgré des

déficits observés entre mars et juin. Plusieurs modèles de CMIP5 indiquent une saison de pluies plus humide en Afrique de l’Ouest à la fin du XXI^{ème} siècle (Biasutti, 2013). Globalement, en Afrique de l’Ouest, il n’y a pas de consensus des sorties des modèles climatiques quant à l’évolution future des précipitations, mais les changements pourront être importants avec des taux de variation des précipitations annuelles entre -20% et $+20\%$ (Sultan et al., 2013).

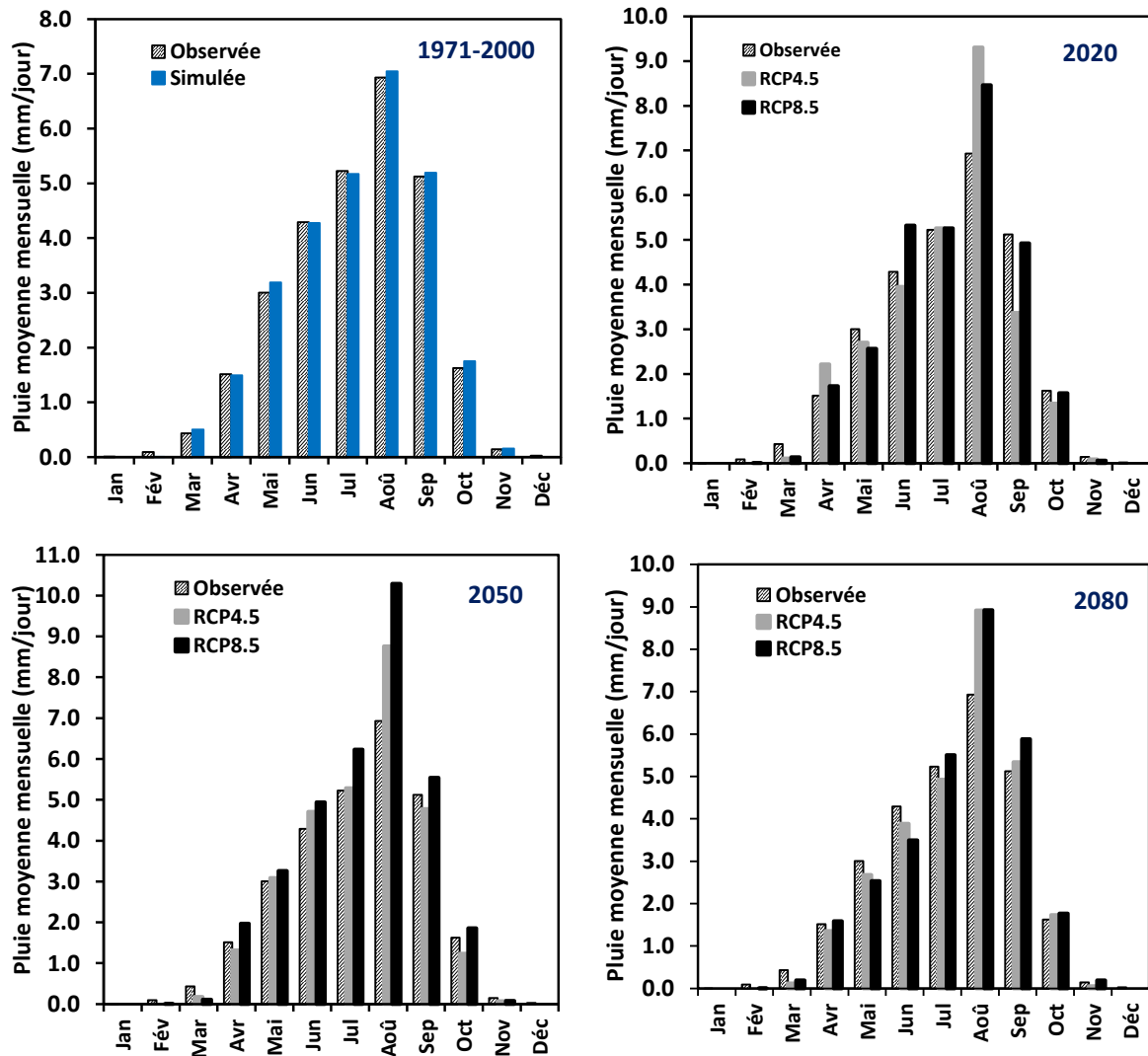


Figure 7 - 7 : Comparaison des données simulées entre les différents RCP aux horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) et la période de référence (1971-2000) d’une part, et entre les pluies moyennes mensuelles historiques simulées et observées, d’autre part.

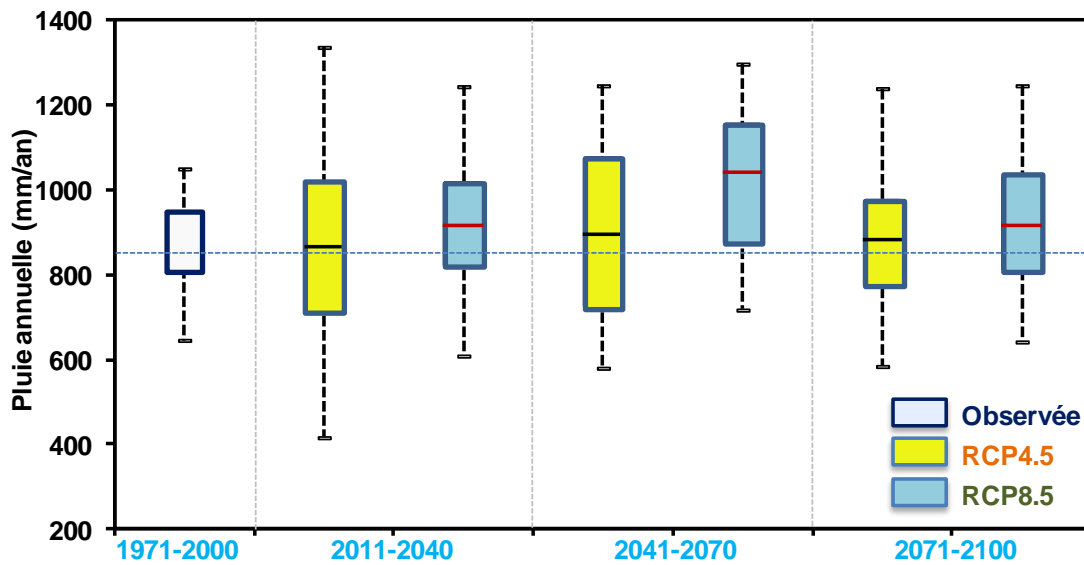


Figure 7 - 8 : Evolution des cumuls annuels des pluies à Boura sur la période de référence (1971-2000) et les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

7.4.2 Evolution de l'évapotranspiration potentielle

Les projections de température moyenne à la fin du XXI^{ème} en Afrique de l'Ouest pour les modèles du projet CMIP5 sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 varient entre 3 et 6°C comparée à la dernière période de référence du XX^{ème} siècle (Diallo et al, 2012). Cette augmentation de température peut impliquer un accroissement de l'ETP.

La **Figure 7 - 10** présente la gamme annuelle de l'ETP observée et simulée. Les données corrigées de l'ETP ont reproduit la tendance à la hausse de l'ETP annuelle. Ainsi, les taux de variations moyennes d'ETP annuelles pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) par rapport à la moyenne d'ETP observées de la période de référence 1971-2000 sont compris entre +1% et +9% (**Tableau 7 - 3**). Ces variations ne cessent de croître de l'horizon 2020 à l'horizon 2080. Une hausse de l'ETP est observée, quel que soit le scénario RCP envisagé. Contrairement aux précipitations annuelles, des faibles dispersions sont observées dans les séries de l'ETP avec des coefficients de variation inférieurs à 3% (**Tableau 7 - 3**).

Tableau 7 - 3 : Paramètres statistiques des cumuls annuels d'ETP observées et simulées pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080).

Paramètres	Période de référence	2020		2050		2080	
	Observation	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Moyenne (mm)	1910,0	1964,3	1932,1	1995,6	1983,9	2012,2	2084,1
Variation relative (%)	-	2,8	1,2	4,5	3,9	5,4	9,1
Ecart-type (mm)	53,7	36,9	42,6	40,9	48,6	46,1	52,6
Coefficient de variation (%)	2,8	1,9	2,2	2,0	2,4	2,3	2,5

De même, une analyse de l'évolution de l'ETP saisonnière montre que le modèle RCA4 reproduit assez bien la saisonnalité observée avec des maxima d'ETP moyenne mensuelle en au mois de mars (**Figure 7 - 9**). Les ETP moyennes mensuelles simulées à l'horizon 2020 présentent des valeurs proches des ETP moyennes observées. Les écarts entre l'ETP actuelle (observée) et les ETP futures ne vont cesser de croître surtout à l'horizon 2080 avec le scénario RCP8.5 où l'on prévoit un accroissement continu du forçage radiatif (niveaux de concentration des GES très élevés) à la fin du XXI^{ème} siècle. Pour le scénario RCP4.5, on observe une faible augmentation à l'horizon 2080, cela est due à la stabilisation du forçage radiatif avant la fin du siècle (stratégies et technologies pour la réduction des gaz à effet de serre).

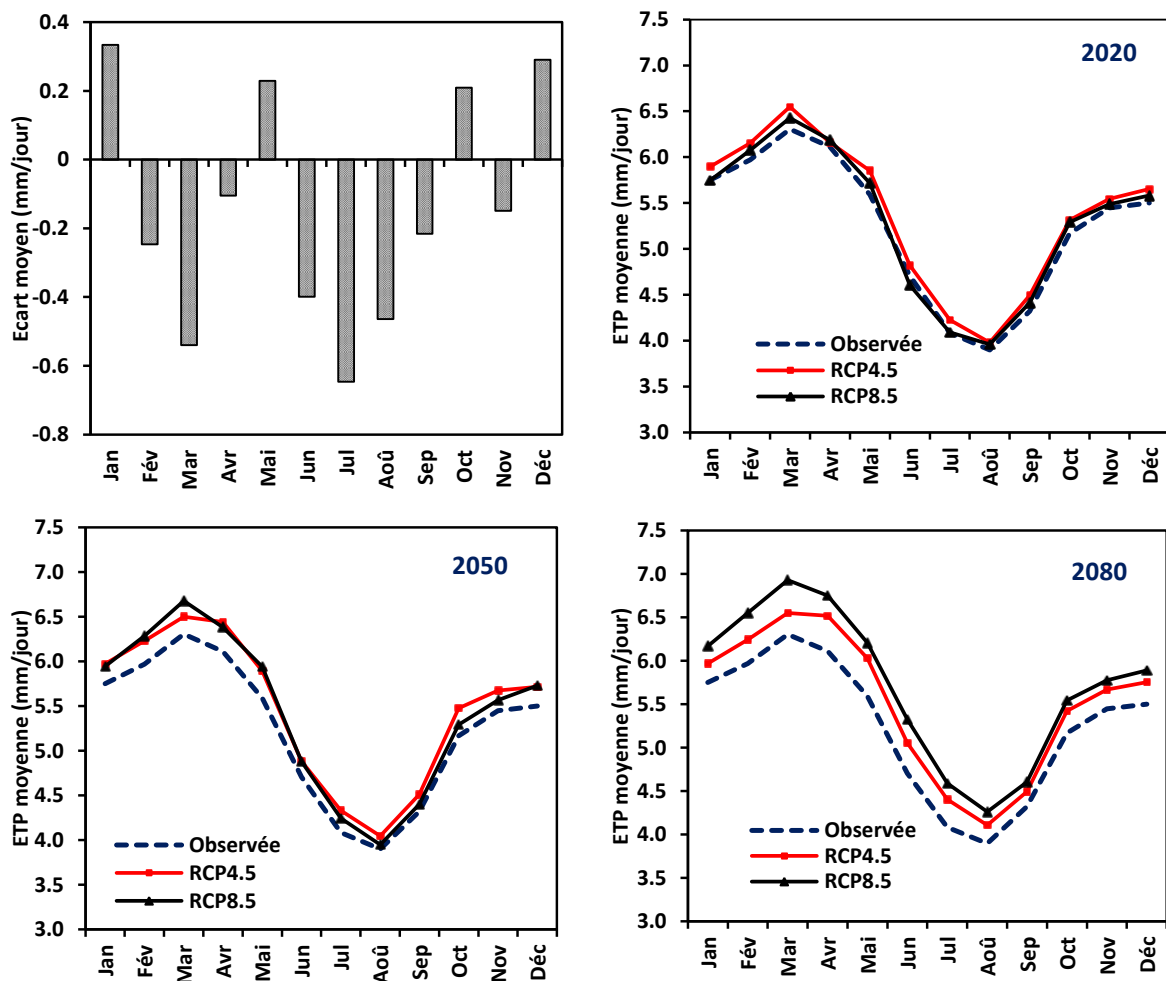


Figure 7 - 9 : Facteurs correctifs d'ETP journalières brutes et évolution du cycle annuel d'ETP moyennes mensuelles sur les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et sur la période de référence.

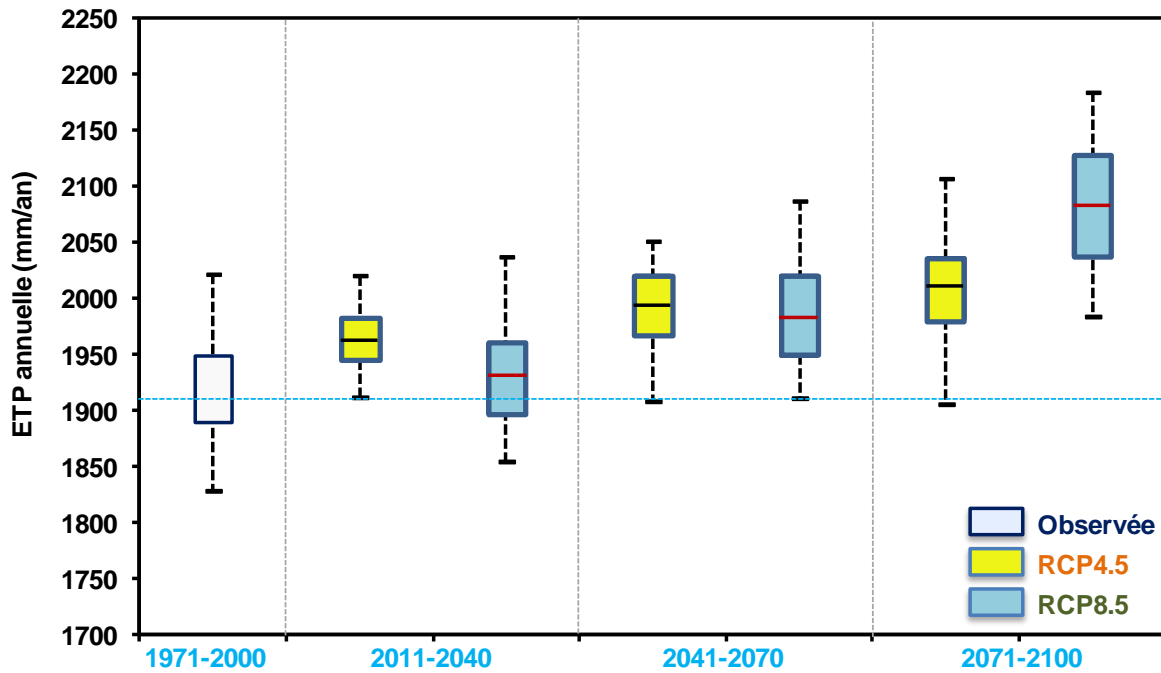


Figure 7 - 10 : Evolution des ETPs moyennes annuelles à Boura entre la période de référence (1971-2000) et les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Cette tendance à la hausse de l'ETP sous les conditions du changement climatique avec le scénario d'émission IS92a est aussi présentée par Jung et al. (2012) sur le bassin de la Volta. De même, Ruelland et al. (2012) ont montré aussi une augmentation de l'ETP annuelle sur un bassin soudano-sahélien en Afrique de l'Ouest dans une gamme de +4% à +18% aux horizons futurs (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2099) par rapport à la période 1961-1990 sous scénario d'émission A2.

Les cycles saisonniers des précipitations et de l'ETP simulées aux horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les deux scénarios RCP sur le bassin versant en amont du barrage de Boura, sont illustrés respectivement par les **Figure 7 - 11a** et **Figure 7 - 11b**. Ces figures montrent que les variations saisonnières des données simulées corrigées sont proches de celles observées, ce qui est vrai pour les données brutes.

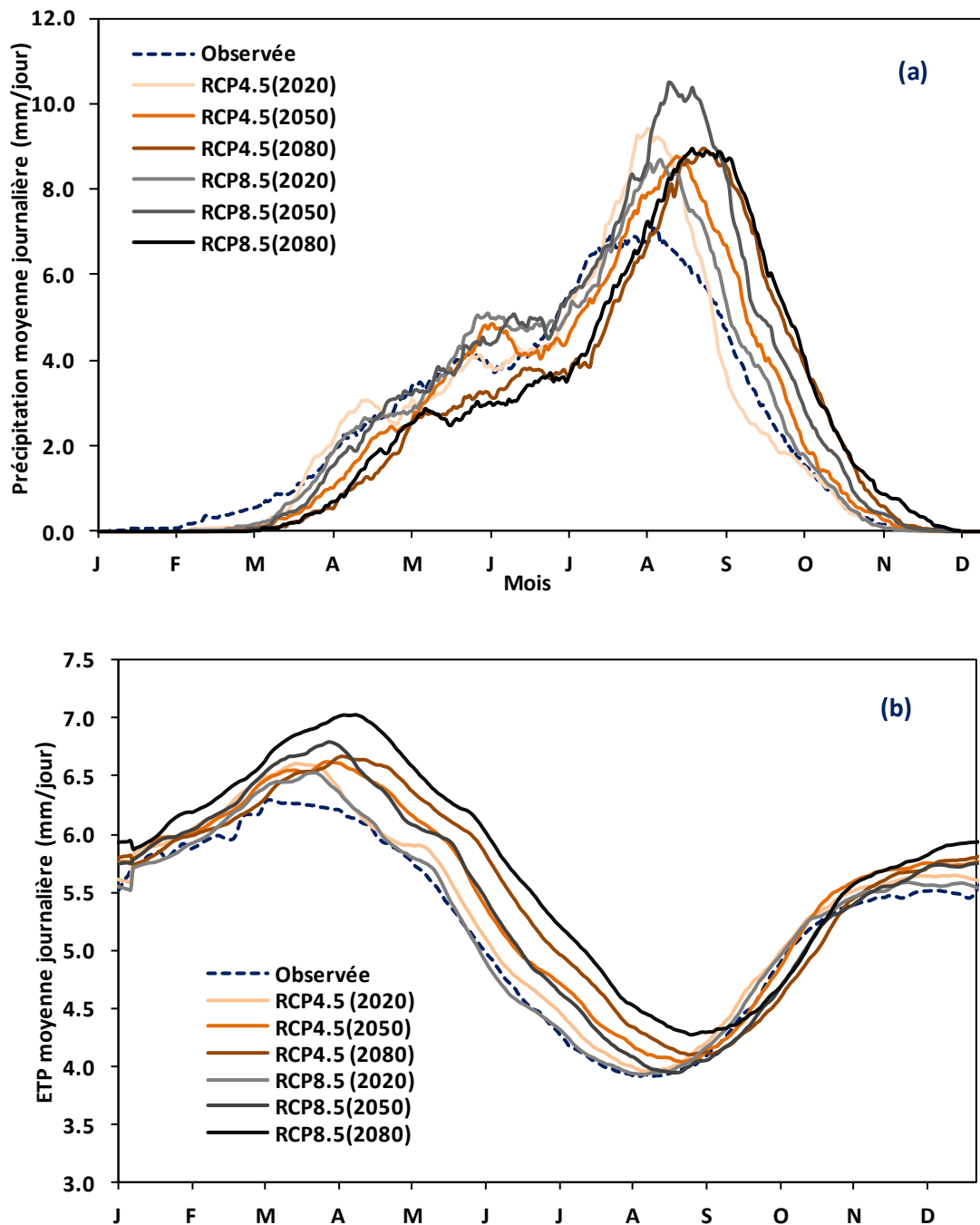


Figure 7 - 11 : Cycles saisonniers des précipitations (a) et de l'ETP (b) observées et simulées sur le bassin amont de Boura sur la période de référence (1971- 2000) et aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5. Les cycles ont été lissés sur 30 jours.

7.5 Simulation des apports futurs et demandes futures en eau agricoles à Boura

7.5.1 Simulation des apports futurs dans le réservoir de Boura

Les scénarios météorologiques journaliers (précipitations et ETP) élaborés sur la base des simulations du modèle RCA4, à l'échelle du bassin versant en amont du réservoir de Boura, sont utilisés comme entrée au modèle hydrologique GR4J présenté à la section 5.1, afin de simuler les apports dans le réservoir pour le XXI^{ème} siècle. Pour cela, nous avons supposé que

les paramètres du modèle conceptuel GR4J et les hydrogrammes unitaires obtenus sur la période d'étalonnage (avril 2012 à mars 2014) resteront stables dans le futur (n'évolueront pas dans le temps). Cette stabilité des paramètres du modèle peut se traduire en stabilité du comportement hydrologique du bassin versant. La relation pluie-débit restera inchangée sur toute la période de simulation. Cette hypothèse est bien sûr questionnable (Le Lay et al., 2007).

Le modèle GR4J avec le jeu de paramètres calés doit permettre de reconstituer les apports du bassin versant sur la période de référence (1971-2000) et de simuler les écoulements aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080). Les valeurs des débits journaliers simulés peuvent être comparées aux débits reconstitués afin d'évaluer les changements en terme de taux de variation.

7.5.2 Projections futures des demandes en eau agricoles

En supposant le calendrier agricole relativement stable, les coefficients culturaux sont ajustés pour chaque culture et pour chaque mois. Ainsi, les scénarios météorologiques mensuels (ETP) construits sur la base des simulations du modèle RCA4 corrigées sont utilisés comme entrée du modèle d'estimation des besoins en eau présenté à la section 5.2, afin de simuler les besoins en eau des cultures pour le XXI^{ème} siècle. On suppose également que la relation exprimant la pluie efficace restera identique en climat futur (cf. section 5.2.3). Les demandes en eau d'irrigation sont estimées pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) et pour la période de référence (1971-2000). Dans cette partie, nous faisons aussi l'hypothèse que, le couvert végétal et l'utilisation des sols resteront identiques au présent sur l'ensemble de la période de simulation. Cette hypothèse est également et comme précédemment questionnable.

7.6 Etudes des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les demandes en eau agricoles

7.6.1 Impacts sur les ressources en eau

Les séries de précipitations et d'ETP journalières issues des scénarios climatiques sont utilisées pour simuler les écoulements au pas de temps journalier. Cependant, les caractéristiques des écoulements simulés sont appréciées aux pas de temps mensuel et annuel. Comme dans la plupart des études d'impact du changement climatique sur les ressources en eau, les caractéristiques des débits simulés à divers horizons sont comparées à celles des débits reconstitués sur une période de référence (Boyer et al., 2010; Ruelland et al., 2012). De cette étude, on peut observer que les signaux des variations des précipitations projetées pour les trois horizons futurs (2020, 2050 et 2080) par rapport à la période de référence (1971-2000) sont amplifiés au niveau des écoulements moyens. Ainsi, une gamme des écarts

d'écoulements moyens annuels de +30% à +130% est projetée aux horizons d'intérêt comparée à la référence 1971-2000 (**Tableau 7 - 4**). Les taux de variation sont plus importants avec le scénario RCP8.5. La tendance est à l'augmentation des débits moyens annuels quel que soit le scénario RCP et l'horizon considérés. On note également une forte variabilité interannuelle des lames d'eau écoulées pour les périodes futures avec des coefficients de variation très élevés, nécessitant une capacité du réservoir plus élevée pour satisfaire les demandes en eau existantes. Dans une moindre mesure, il va falloir porter l'effort à l'avenir au niveau des règles de gestion (distribution temporelle de la ressource en eau) des ouvrages.

Les écoulements sont plus sensibles aux variations sur les précipitations qu'aux variations sur les températures via celles de l'ETP (**Tableau 7 - 5**). Ces résultats corroborent ceux du GIEC (IPCC, 2001, 2013) qui ont montré que les variations des débits simulés suivent largement les variations des précipitations pour le futur, et confirment l'analyse de sensibilité faite à la section 5.1.3 pour le modèle GR4J. Aich et al. (2014) ont lié la forte sensibilité des bassins versants aux variations des précipitations à leurs faibles coefficients de ruissellement. Il en est de même pour Jung et al. (2012) qui ont montré qu'une variation de moins de 5% des précipitations moyennes annuelles dans le bassin de la Volta en Afrique de l'Ouest, conduirait à une hausse des débits moyens annuels de l'ordre de 16%.

L'augmentation des écoulements moyens annuels futurs sur le bassin amont du barrage de Boura peut-être aussi attribuée au nombre important d'évènements pluvieux très forts simulés comparés aux observations de même classe. Globalement, le modèle RCA4 projette une augmentation des écoulements sur les décennies à venir sur le bassin de Boura. Cette augmentation sera plus accentuée sur la décennie 2050 avec le scénario RCP8.5.

Tableau 7 - 4 : Indicateurs statistiques des écoulements moyens annuels.

Paramètres	1971-2000	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	Reconstitués	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Moyenne (mm)	39,2	50,5	57,9	56,9	91,9	54,7	63,9
Variation relative (%)	-	28,7	47,5	45,1	134,2	39,5	63,0
Ecart-type (mm)	19,4	39,5	49,8	45,0	59,4	48,7	54,1
Coefficient de variation (%)	49,5	78,3	86,1	79,0	64,6	89,1	84,6

La comparaison des hydrogrammes moyens mensuels aux horizons 2020, 2050 et 2080 avec celui de la période de référence (1971-2000) permet d'apprécier si les variations annuelles des débits simulés s'accompagnent d'une modification du régime hydrologique. La **Figure 7 - 12** illustre les distributions des débits moyens mensuels simulés aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) et comparées à celle de la référence. Les pics de crues apparaîtront plus précoces aux horizons 2020 et 2050 quel que soit le scénario RCP considéré comparés aux

débites reconstitués. Pour les horizons 2020 et 2050, les débits maxima moyens apparaîtront au mois d'août, tandis qu'ils sont projetés au mois de septembre à l'horizon 2080 comme observé avec les débits moyens mensuels reconstitués. Cependant, les pics de crues ont été observés en août en 2012 et 2014. On constate la modification des volumes écoulés d'un horizon à l'autre, est en accord avec les écarts des précipitations telles que prévues par les projections climatiques.

Dans l'ensemble, on peut relever des écoulements plus importants pendant la période des hautes eaux que ceux reconstitués. On observe également une modification de la période de basses eaux à l'horizon 2050. Elle débute toujours en novembre mais se termine un mois plus tôt en mai.

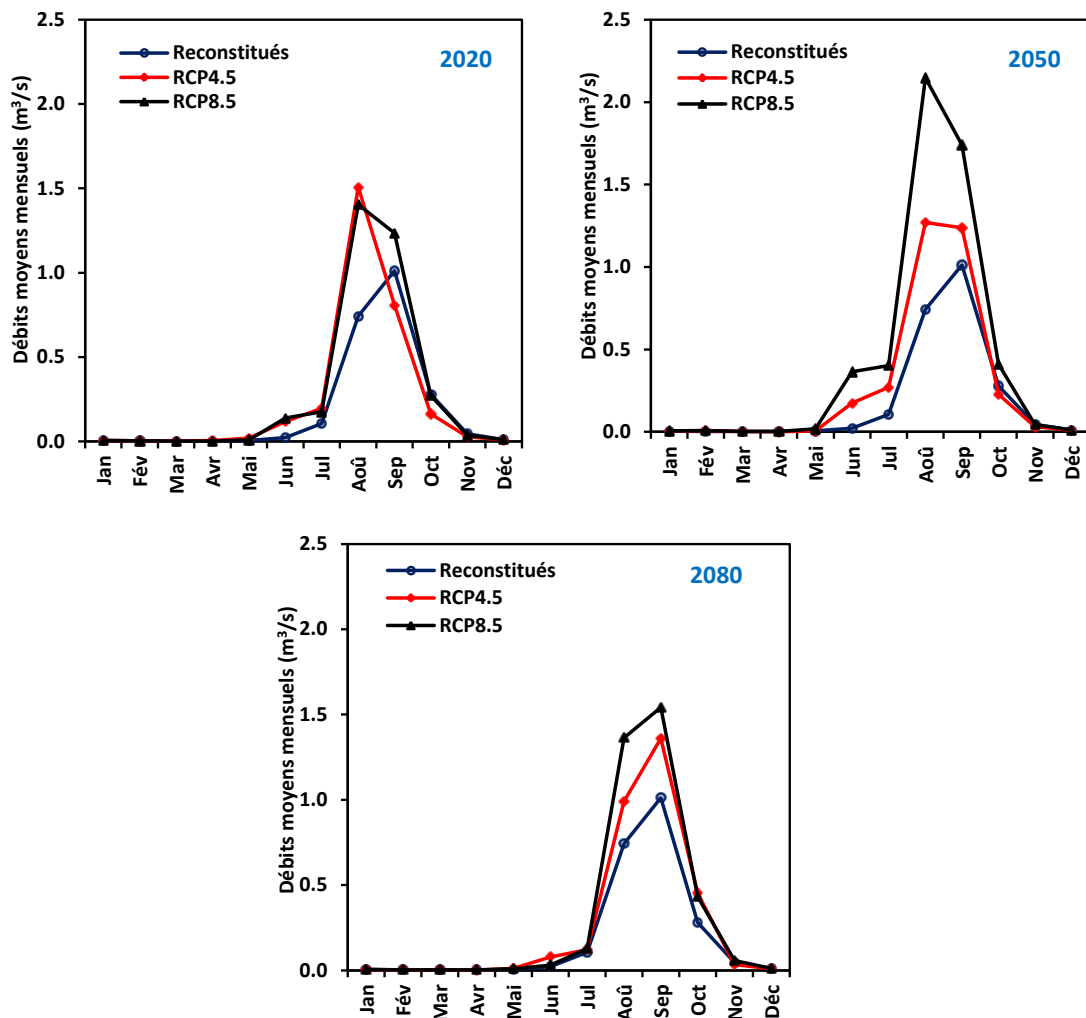


Figure 7 - 12 : Hydrogrammes des débits moyens mensuels simulés aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 comparés à celui de la période de référence (1971-2000).

Tableau 7 - 5 : Récapitulatif de l'impact du changement climatique sur les variables hydrologiques du bassin amont du barrage de Boura.

Période	Scénarios	Pluie annuelle (taux de variations en % par rapport à l'historique)	ETP annuelle (taux de variations en % par rapport à l'historique)	Écoulement annuel (taux de variations en % par rapport à l'historique)
		Moyenne	Moyenne	Moyenne
Historique 1971-2000	-	857 mm/an	1910 mm/an	39 mm/an
Futur proche 2011-2040	RCP4.5	870 (1%)	1964 (3%)	51 (28%)
	RCP8.5	919 (7%)	1932 (1%)	58 (48%)
Futur moyen 2041-2070	RCP4.5	902 (5%)	1996 (5%)	57 (45%)
	RCP8.5	1050 (23%)	1984 (4%)	92 (134%)
Futur lointain 2071-2100	RCP4.5	889 (4%)	2012 (5%)	55 (40%)
	RCP8.5	922 (8%)	2084 (9%)	64 (63%)

7.6.2 Impacts sur les demandes en eau agricoles

L'eau est un facteur de production essentiel pour l'agriculture. Le changement climatique aura probablement un impact significatif sur l'agriculture en ce qui concerne les demandes en eau agricoles. Les conditions climatiques changeantes entraînent des déséquilibres entre précipitations et besoins en eau des cultures durant leur période de développement. Les besoins en eau des spéculations considérées (riz, maïs et tomate) dans cette étude sont estimés pour les horizons futurs et la période de référence.

Les changements des besoins nets et des volumes moyens annuels des demandes en eau pour les cultures considérées et par scénario RCP aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) par rapport aux données reconstituées sur la période de référence sont présentés dans le **Tableau 7 - 6**. D'après ces résultats, on projette pour le scénario RCP4.5, un accroissement de +4% à +23% des besoins nets moyens d'irrigation des différentes cultures aux horizons futurs tandis que pour le scénario RCP8.5, on observera une baisse jusqu'à 25% pour le riz pluvial aux horizons 2020 et 2050 et une hausse de +2 à +18% pour les autres cultures. Les changements climatiques vont donc engendrer une augmentation des volumes d'irrigation par an sur la base des superficies emblavées actuelles (**Tableau 7 - 6**). Cette augmentation sera globalement plus accentuée à l'horizon 2080 quel que soit le scénario RCP. Steinemann & Cavalcanti (2006) ont considéré une augmentation de +10% des demandes en eau comme un déclencheur du stress du système. Si ce déclencheur devait être appliqué dans notre cas, il y aurait stress dans le système au regard de l'augmentation des besoins nets de toutes les cultures exceptée la tomate à l'horizon 2080.

En plus, les comparaisons des volumes totaux moyens mensuels des demandes d'irrigation pour les périodes futures (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100) par rapport à ceux de la période de référence indiquent que les demandes d'irrigation augmenteront dans le futur

surtout pendant les mois de mars à mai avec des taux de variation allant jusqu'à 20% (**Figure 7 - 13**). Cette période correspond à la période de fortes sollicitations des volumes d'eau disponibles dans le réservoir de Boura pour des besoins d'irrigation.

Döll (2002) a estimé que les changements projetés des précipitations, combinés à une augmentation de l'évaporation sous l'effet de l'augmentation de la température, augmenteraient les besoins nets d'irrigation en Afrique de l'Ouest, avec des taux de variation de l'ordre de +5% d'ici 2070. Fischer et al. (2007) ont indiqué que les besoins nets d'irrigation augmenteront à l'horizon 2080 en Afrique Sub-saharienne dans un contexte de changement climatique.

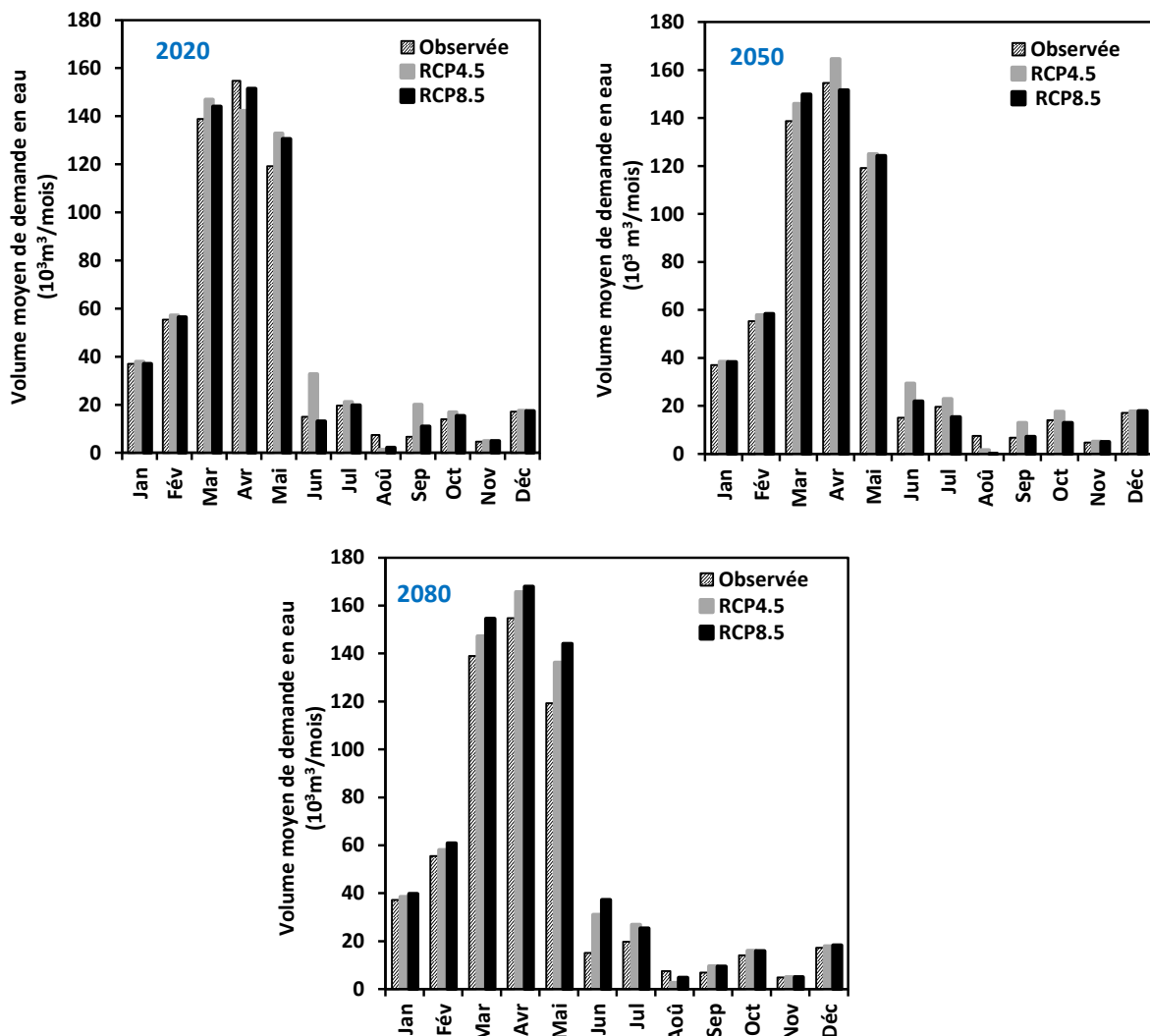


Figure 7 - 13 : Evolution des volumes moyens mensuels des demandes en eau d'irrigation pour les trois horizons 2020, 2050 et 2080 avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 comparés aux volumes reconstitués sur la période de référence 1971-2000.

Tableau 7 - 6 : Besoins nets moyens annuels d'irrigation et variations absolues des volumes de demande en eau au niveau des aménagements agricoles autour du réservoir de Boura aux horizons futurs (2020, 2050 et 2080) par rapport à ceux de la période de référence (1971-2000).

Scénario	Cultures	Superficie (ha)	BN _{ref} (mm)	BN _{fp} (mm)	BN _{fm} (mm)	BN _{fl} (mm)	BN _{fp} /BN _{ref}	BN _{fm} /BN _{ref}	BN _{fl} /BN _{ref}	ΔV _{ref-fp} (m ³)	ΔV _{ref-fm} (m ³)	ΔV _{ref-fl} (m ³)
RCP4.5	Riz saison sèche	70	674,47	706,80	721,38	741,77	1,05	1,07	1,10	18946	28805	42639
	Riz pluvial	40	139,30	171,40	159,46	159,24	1,23	1,14	1,14	16762	11994	11909
	Maïs	10	467,73	486,40	505,05	518,87	1,04	1,08	1,11	1818	2980	4276
	Tomate	20	640,44	663,70	676,76	672,85	1,04	1,06	1,05	3819	6054	5101
RCP8.5	Riz saison sèche	70	674,47	691,79	704,61	777,19	1,03	1,04	1,15	9888	15573	62897
	Riz pluvial	40	139,30	129,06	104,16	164,30	0,93	0,75	1,18	-162	-10124	13930
	Maïs	10	467,73	483,46	484,35	539,30	1,03	1,04	1,15	1369	1161	5902
	Tomate	20	640,44	652,44	680,25	696,26	1,02	1,06	1,09	1896	6781	9274

- BN [mm] : Besoin net d'irrigation ;
- ΔV [m³] : Variation de volume sans prise en compte de l'efficacité du système d'irrigation ;
- fp : futur proche (2011-2040);
- fm : futur moyen (2041-2070);
- fl : futur lointain (2071-2100) ;
- ref : référence (1971-2000).

7.7 Simulation du réservoir de Boura en climat futur avec WEAP

Les impacts du changement climatique ont été étudiés sur les apports du bassin versant drainant le réservoir de Boura et sur les demandes en eau agricoles aux horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080) par rapport à la période de référence (1971-2000). Pour apprécier les répercussions des impacts projetés du changement climatique sur la disponibilité de l'eau du réservoir de Boura et l'irrigation, le modèle WEAP est mis en œuvre au pas de temps mensuel sur les périodes de simulation. Ce modèle permet de simuler des scénarios alternatifs intégrant différentes options de gestion et de développement.

7.7.1 Scénarios de développement et mode de gestion

Pour explorer les effets du changement climatique sur la dynamique du réservoir, trois scénarios reflétant divers degrés de développement ont été élaborés et simulés sur la base d'un mode de gestion. Une brève description de chaque scénario considéré est donnée ci-dessous :

Scénario 1 : Changement climatique uniquement (100% de demande)

Dans ce scénario, on suppose que les variations des demandes agricoles futures en eau sont dues uniquement aux variations des conditions climatiques. Les spéculations et surfaces aménagées actuelles resteront inchangées dans le futur.

Scénario 2 : Changement climatique + variétés de cultures et technologie d'irrigation améliorées (50% de demande)

Dans ce scénario, on suppose qu'il y aura une diminution de 50% des demandes en eau agricoles par rapport à celles du scénario 1. Cette diminution des demandes peut être due à une combinaison des hypothèses suivantes : la baisse des superficies mises en culture, la combinaison des spéculations (choix de variétés à cycle court et moins exigeantes en eau) et l'accroissement de l'efficacité du système d'irrigation (acquisition des nouvelles technologies, amélioration du réseau d'irrigation, modernisation des méthodes d'irrigation).

Scénario 3 : Changement climatique + variétés de cultures et extension des périmètres aménagés (150% de demande)

Dans ce scénario, on suppose qu'il y aura une augmentation de 50% des demandes en eau agricoles par rapport à celles du scénario 1. Cette augmentation des demandes peut être due à une combinaison des hypothèses suivantes : l'extension des superficies irriguées (actuellement moins de 100 ha sont aménagés pourtant le potentiel irrigable autour du réservoir de Boura était estimé à plus 130 ha), la baisse de l'efficacité du système d'irrigation (dégradation accentuée du réseau d'irrigation, mauvaise gestion de l'eau, non respect du

calendrier agricole), la densification des campagnes agricoles et le changement de spéculation (choix de variétés plus exigeantes en eau).

Le mode de gestion utilisé pour simuler le fonctionnement du réservoir de Boura est la règle de gestion par zones. Pour la gestion par zones, on suppose qu'en dessous de la côte de prise du réservoir, on ne peut plus effectuer des prélèvements pour les usages agricoles (respect scrupuleux de la capacité morte du barrage). Pour chaque scénario, la demande est supposée être la même pour la période de référence.

7.7.2 Résultats des simulations des scénarios de développement et impacts du changement climatique sur les indices de performance du réservoir

Les changements projetés sur les précipitations et les ETP sont susceptibles d'affecter la disponibilité des ressources en eau et les demandes, et par conséquent la performance du système modélisé (réservoir de Boura).

Les courbes de remplissage du réservoir qui montrent l'évolution des fréquences au dépassement d'un volume stocké du réservoir pour chaque scénario de développement sont présentées à la **Figure 7 - 14**. Ces graphiques projettent des situations d'assèchement total du réservoir avec une fréquence au dépassement supérieure à 90%. Ces défaillances résultent d'apports très insuffisants dans le réservoir certaines années (forte variabilité interannuelle des écoulements du bassin versant en amont du réservoir de Boura). Globalement, pour tous les horizons futurs et quel que soit le scénario RCP considéré, on aura au plus 40% de chance d'avoir un stock du réservoir inférieur à 1 Mm³ sur l'horizon entier de simulation.

La fréquence au dépassement de la capacité maximale du réservoir augmentera dans le futur quel que soit le scénario de développement et le scénario RCP considérés par rapport à la période de référence excepté à l'horizon 2080 pour le scénario RCP4.5 et les scénarios de développement 100% et 150% de demande. Cette augmentation est plus accentuée avec la diminution des demandes en eau agricoles (50% de demande). La gamme de variations fluctue entre -10% et +77%. On observe également que les fréquences de violation de la capacité minimale du réservoir augmenteront avec l'accroissement des demandes en eau agricoles. Cette augmentation est plus accentuée pour les scénarios de développement 100% et 150% de demande à l'horizon 2080. Pour des faibles demandes (50% de demande), la fréquence de violation du stock minimal baissera considérablement jusqu'à 82% à l'horizon 2050 pour le scénario RCP8.5 (**Tableau 7 - 7**).

Le déversement n'est pas en réalité un échec ou une défaillance du système de gestion puisque les volumes d'eau écoulés par débordement sur le déversoir permettent d'assurer les fonctions écosystémiques en aval du barrage. Cependant, si nous considérons le déversement

comme une défaillance relative aux limites des stocks (capacités minimale et maximale), on peut dire que la fiabilité du système de gestion vis-à-vis des limites de stock du réservoir baissera aux horizons futurs (2020, 2050 et 2080) comparée à la période de référence (1971-2000) excepté le scénario de développement correspondant à 50% de demande (Vogel & Bolognese, 1995).

Tableau 7 - 7 : *Fréquences (%) de violations des stocks minimum et maximum du réservoir sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.*

Scénarios	Horizons	Demande	$V \geq V_{\max}$	$V_{\min} < V < V_{\max}$	$V \leq V_{\min}$
-	Référence		10,8	76,1	13,2
RCP4.5	2020	100%	11,0	69,1	19,9
	2050		11,6	69,1	19,4
	2080		10,2	69,4	20,4
RCP8.5	2020		14,0	68,8	17,2
	2050		18,3	73,7	8,1
	2080		12,1	65,3	22,6
RCP4.5	2020	50%	11,8	76,9	11,3
	2050		12,1	76,1	11,8
	2080		11,0	78,2	10,8
RCP8.5	2020		14,8	73,7	11,6
	2050		19,1	78,5	2,4
	2080		12,9	76,6	10,5
RCP4.5	2020	150%	10,5	66,7	22,8
	2050		11,1	65,0	23,9
	2080		9,7	66,9	23,4
RCP8.5	2020		13,4	62,6	23,9
	2050		18,3	71,5	10,2
	2080		11,5	62,4	26,1

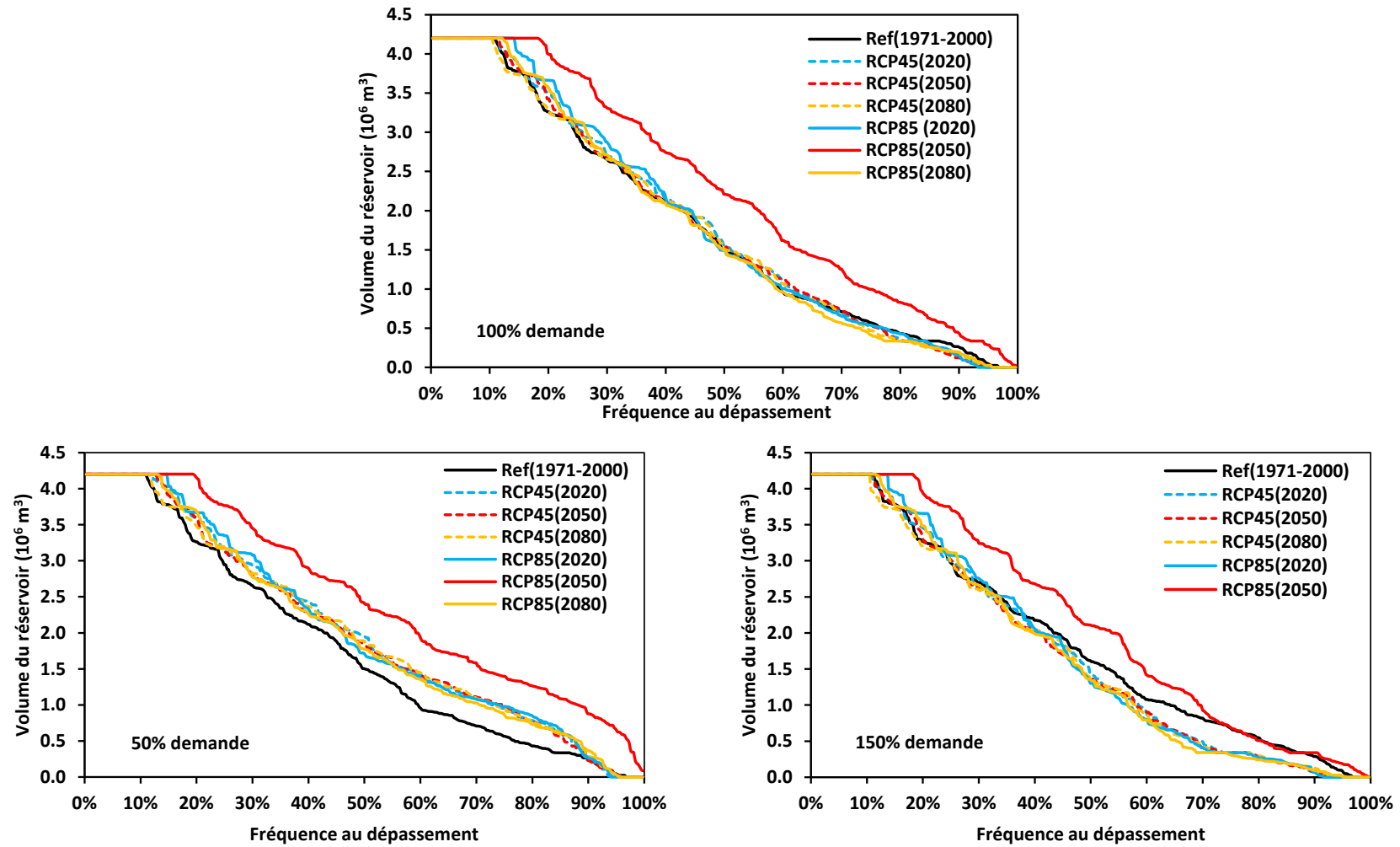


Figure 7 - 14 : Evolution des stocks simulés à la fin de chaque mois en fonction de la fréquence d'apparition sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.

La **Figure 7 - 15** illustre les trajectoires moyennes simulées de la dynamique du réservoir sur les trois horizons d'intérêt de gestion ainsi que la période de référence (1971-2000). On constate que l'évolution interannuelle des stocks d'eau simulés sera influencée par le changement du climat (modification des apports dans le réservoir et des sollicitations en termes d'usages). Ces résultats corroborent ceux de Dupeyrat et al. (2008) obtenus sur le bassin de la Garonne. La variabilité des trajectoires de stocks d'eau dépend fortement de la variabilité des apports au réservoir (Parent, 1991). A l'horizon 2050 pour le scénario RCP8.5 et quel que soit le scénario de développement (150%, 100% et 50% de demande), les trajectoires du réservoir sont quasiment différentes des autres trajectoires en termes d'amplitude. Ces courbes de remplissage permettent d'apprécier une modification de la gestion pour un système quelconque.

Les trajectoires moyennes (future et historique) du réservoir ont la même évolution. Un déstockage continu de novembre à mai suivi d'un remplissage de mai à octobre. La décroissance sera plus rapide pour les scénarios de développement avec les demandes en eau importantes (par exemple scénario 150% demande). Les changements projetés sur les apports et les demandes en eau contribueront à un remplissage précoce du réservoir aux horizons futurs excepté l'horizon 2080 pour le scénario RCP8.5. En effet, le stock minimal observé en juin sur la période de référence (1971-2000) est décalé en mai. On constate aussi que la phase de remplissage serait plus lente à l'horizon 2080 quel que soit le scénario de développement.

La similarité entre deux trajectoires des volumes stockés (période future et période de référence) est évaluée quantitativement à travers le critère de Nash & Sutcliffe (1970). Les valeurs de Nash-Sutcliffe obtenues sont relativement faibles (inférieure à 50%). Ces faibles valeurs traduisent ainsi la forte saisonnalité de la variable de stock simulé (Gupta et al., 2009).

Le **Tableau 7 - 8** regroupe les résultats du test statistique de Wilcoxon signé appliqué aux couples des séries de données du volume moyen mensuel du réservoir de la période de référence et de chacune des périodes futures. Il ressort que les différences entre les trajectoires obtenues aux horizons 2050 et 2080 pour le scénario climatique RCP8.5 et quel que soit le scénario de développement et celle obtenue sur la période de référence sont significatives au seuil de 5% ($p\text{-value} < 0,05$). Par ailleurs, aucune différence significative est observée entre les couples de séries de données aux horizons 2020 et 2050 pour le scénario RCP4.5 et quel que soit le scénario de développement.

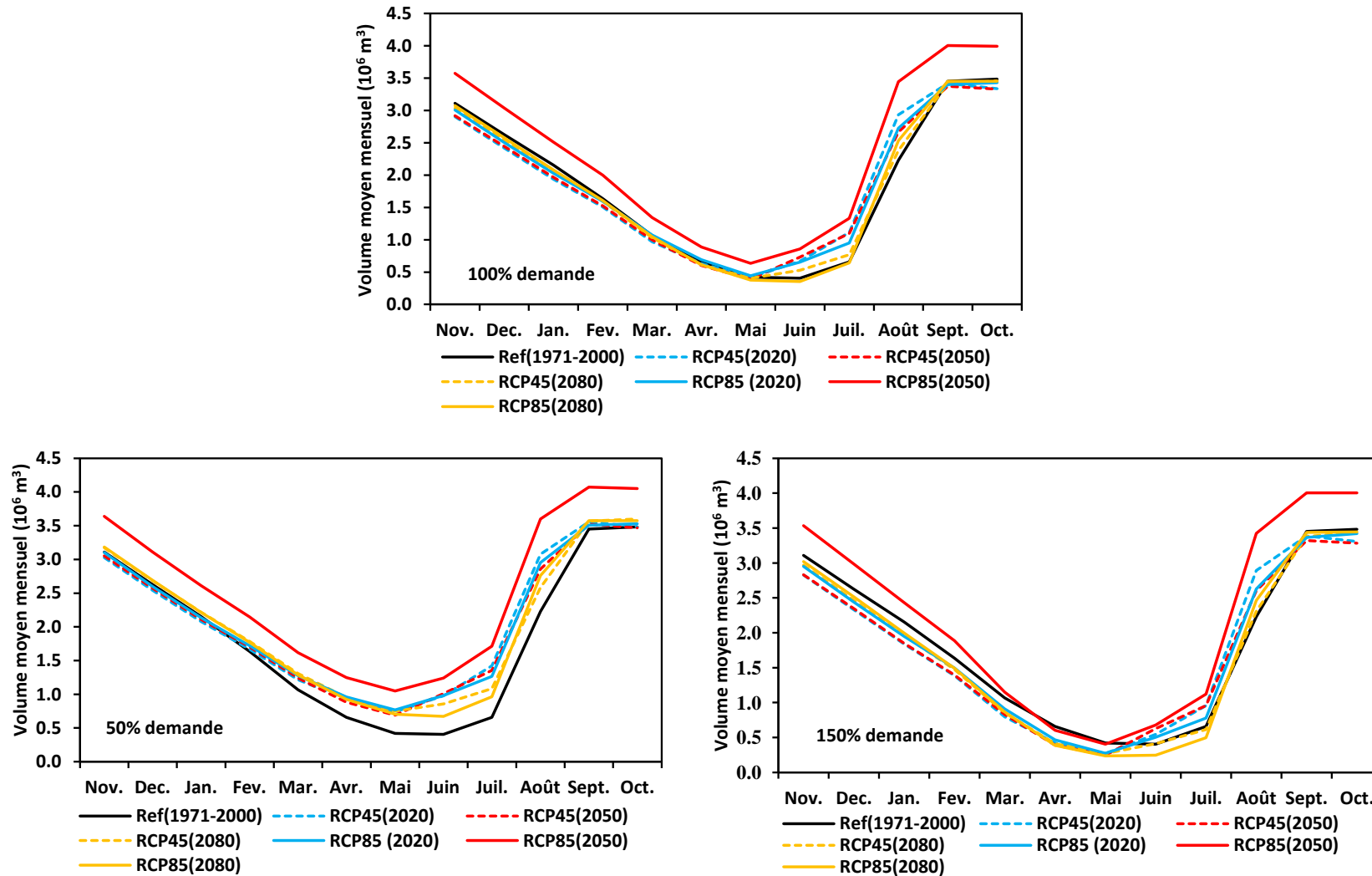


Figure 7 - 15 : Courbes de remplissage du réservoir sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.

Tableau 7 - 8 : Résultat du test statistique appliqué aux couples de séries de données des volumes moyens mensuels sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.

Scénarios	Horizons	Demande	p-value	Différence (5%)
RCP4.5	2020	100%	0,53	Non significative
	2050		0,39	Non significative
	2080		0,01	Significative
RCP8.5	2020	100%	0,08	Non significative
	2050		0,00	Significative
	2080		0,01	Significative
RCP4.5	2020	50%	0,12	Non significative
	2050		0,08	Non significative
	2080		0,00	Significative
RCP8.5	2020	50%	0,00	Significative
	2050		0,00	Significative
	2080		0,00	Significative
RCP4.5	2020	150%	0,24	Non significative
	2050		0,31	Non significative
	2080		0,01	Significative
RCP8.5	2020	150%	0,12	Non significative
	2050		0,01	Significative
	2080		0,03	Significative

Les demandes en eau agricoles projetées aux horizons 2020, 2050 et 2080 ne seront pas entièrement satisfaites. On a des taux de couverture inférieurs à 100% (**Tableau 7 - 9**). Globalement, la satisfaction de ces demandes est projetée à plus de 70% quel que soit l'horizon et le scénario RCP considéré. Le taux de couverture élevé observé à l'horizon 2050 pour le scénario RCP8.5 serait dû aux fortes variations de précipitations (+23%) et apports (+134%) projetées. Les taux moyens de couverture des demandes en irrigation diminueront jusqu'à 20% dans le futur par rapport à la période de référence surtout pour le scénario de développement correspondant à 150% de demande.

Tableau 7 - 9 : Taux moyen de couverture de la demande en eau sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.

Scénarios	Horizons	Demande	Taux de couverture moyen (%)
-	Référence		89,4
	2020		84,7
RCP4.5	2050	100%	84,6
	2080		82,2
	2020		85,3
RCP8.5	2050		94,2
	2080		80,5
	2020		90,5
RCP4.5	2050	50%	90,2
	2080		90,3
	2020		89,8
RCP8.5	2050		97,6
	2080		90,6
	2020		79,4
RCP4.5	2050	150%	77,4
	2080		75,4
	2020		78,5
RCP8.5	2050		88,4
	2080		71,9

L'évolution de la moyenne interannuelle des volumes d'eau mensuels lâchés du réservoir pour satisfaire les demandes est présentée à la **Figure 7 - 16**. Sur la base des règles de gestion, les fournitures d'eau sont inférieures aux sollicitations exprimées. Globalement, les demandes moyennes mensuelles interannuelles sont supérieures aux allocations d'eau effectuées entre les mois de mars et mai.

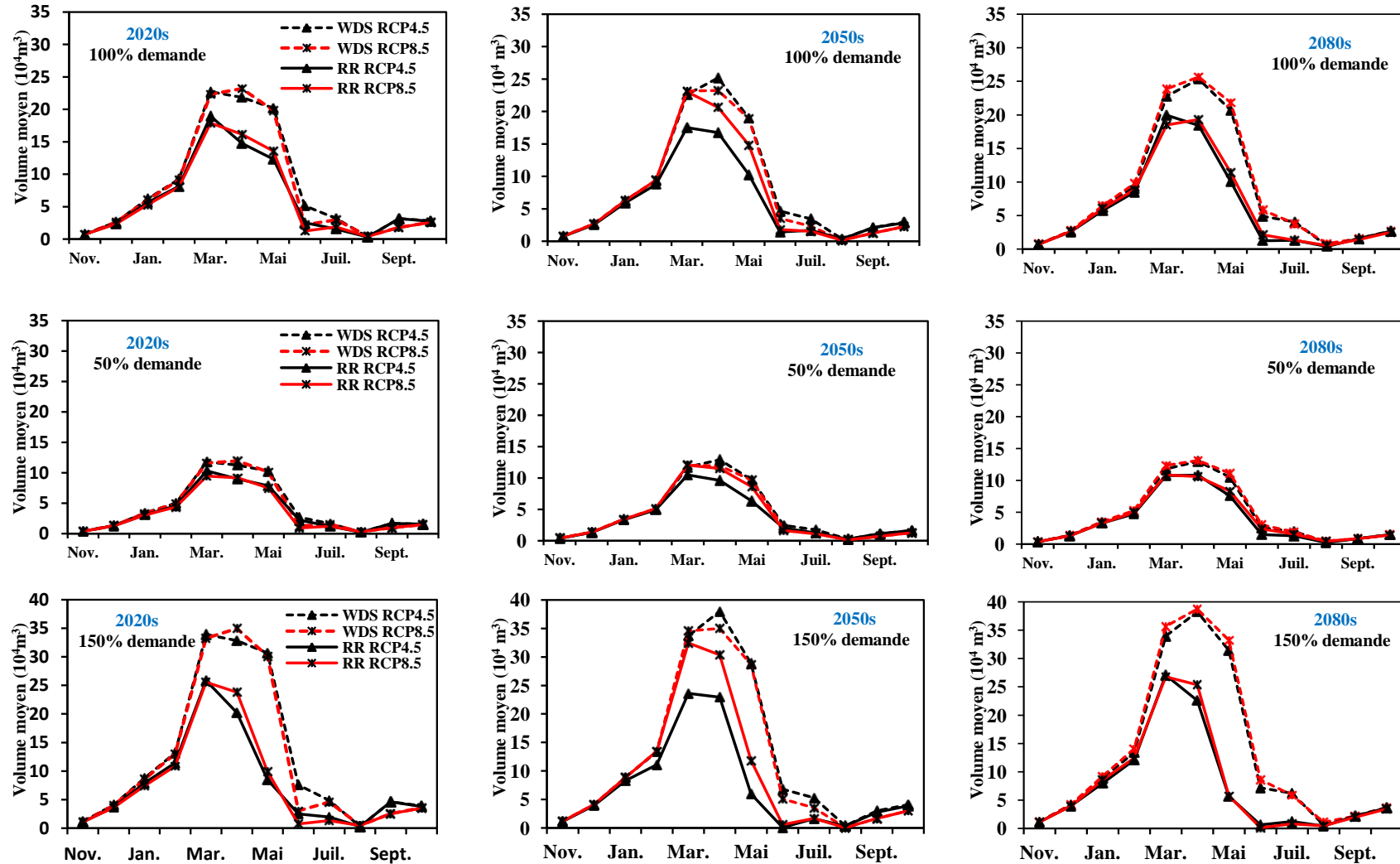


Figure 7 - 16 : Demande en eau (WDS) et fournitures d'eau (RR) pour les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone (WDS: Water Demand Supply ; RR: Release of Reservoir).

En dépit du fait que les trajectoires du réservoir soient très pratiques pour synthétiser le mode de fonctionnement d'un réservoir, ces résultats démontrent l'importance de les associer, à des critères de performance quantitatifs pour évaluer la performance d'un système (Baptiste, 2013).

Généralement, lorsqu'on simule ou optimise un système, on s'intéresse surtout à la performance escompté du système sur l'horizon de gestion (par exemple maximisation ou minimisation de la fonction critère). Cependant, l'utilisation de ce type de critère ne donne aucune information sur la fréquence des états défaillants du système, la durée et la sévérité des défaillances potentielles, ni sur la capacité du système à retourner à un état de fonctionnement satisfaisant après une défaillance (Milutin, 1998). Notre analyse de la performance du système est focalisée sur la capacité du système à remplir adéquatement les fonctions qui lui sont assignées.

Les indices de performance sont évalués sur la période de référence et aux horizons futurs pour différents scénarios climatiques et scénarios de développement. La mise en évidence de l'effet probable des changements climatiques sur les indices de performance des systèmes de ressources en eau est devenue une priorité pour leur gestion future (Walker, 1998; Jofreh et al., 2013).

Les critères de performance relatifs à la satisfaction des demandes sont exposés dans le **Tableau 7 - 10**. En termes de fiabilité, l'interprétation des résultats issus des simulations suggère que le système de gestion serait plus fiable à l'horizon 2050 pour le scénario RCP8.5 comparée à la période de référence. On peut observer une augmentation de la fiabilité jusqu'à 10% pour le scénario de développement 50% de demande. Cet accroissement de la fiabilité est une conséquence de la forte augmentation des précipitations (+23%) et des écoulements (+134%). On observe une baisse de la fiabilité du système sur les autres horizons et quel que soit le scénario RCP comparée à la période de référence. Cette baisse est plus accentuée pour le scénario de développement 150% de demande.

Selon Moy et al. (1986), un réservoir fiable, est un réservoir qui a très peu de défaillance sur la période d'analyse. Sur les horizons futurs, le risque de ne pas satisfaire les demandes en eau agricoles peut atteindre 25%. Jain & Bhunya (2008) ont révélé que les chances d'avoir une fiabilité du système supérieure à 90% sont atteintes lorsque les demandes en eau agricoles sont plus faibles. C'est observé dans notre cas pour le scénario de développement correspondant à 50% de demande.

Cependant, le critère de fiabilité ne permet pas de décrire de façon exhaustive les forces et faiblesses d'une politique de gestion (Hashimoto et al., 1982; Loucks & Van Beek, 2005; Jain & Bhunya, 2008). Dans notre cas, il décrit seulement la fréquence à laquelle le système est capable de satisfaire les demandes exprimées au cours d'une période de temps donnée, sans toutefois fournir des informations sur les défaillances observées pendant les simulations. Ainsi, les critères de résilience et de vulnérabilité complètent celui de la fiabilité pour donner une image complète du risque de défaillance du système. La résilience montre généralement la même tendance que la fiabilité (Hashimoto et al., 1982). Un réservoir résilient, retrouve rapidement son état de fonctionnement normal, et est aussi susceptible d'être vulnérable aux défaillances de grandes amplitudes.

La vulnérabilité est la mesure qui décrit l'ampleur du déficit moyen enregistré. Les résultats projettent que le système sera plus vulnérable dans le futur (le cumul des déficits augmentera) pour le scénario de développement 150% de demande et moins vulnérable lorsque les demandes agricoles seront davantage faibles par rapport à la période de référence. On projette une augmentation de la vulnérabilité jusqu'à 60% à l'horizon 2080 pour le scénario RCP8.5 et pour le scénario de développement 150% de demande.

Pour l'instant, une conclusion qui pourrait se dégager des analyses effectuées est que pour le cas d'étude spécifique, plus la fiabilité du système est importante, moins il est vulnérable et plus il est résilient (par exemple Horizon 2050 avec scénario RCP8.5 quel que soit le scénario de développement). Ces deux derniers critères sont approximativement complémentaires (Moy et al., 1986; Kjeldsen & Rosbjerg, 2004; McMahon et al., 2006). Il ressort des résultats que, lorsque la demande en eau agricole est réduite, la fiabilité et la résilience augmentent, et la vulnérabilité diminue (Sandoval-Solis et al., 2011).

Comme observé par Ashofteh et al. (2013), les changements projetés sur les apports et les demandes en eau aux horizons futurs auront un impact sur les critères de performance. Ainsi, un changement important des apports sous les scénarios de changement climatique aura une influence positive sur l'indice de fiabilité tandis qu'un accroissement de la demande en eau contribuera à une diminution de la fiabilité du système et à un accroissement de la vulnérabilité du système.

Les résultats obtenus corroborent ceux des études antérieures qui ont relevé que, les estimations de la résilience et de la vulnérabilité basées sur les valeurs moyennes de la durée des épisodes défaillants et des demandes non satisfaites sont non-monotones (ne varient pas dans le même sens).

Tableau 7 - 10 : Mesures de performance du modèle de simulation relatifs à la satisfaction de la demande en eau sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarii de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.

Scénarios	Horizons	Demande	Fiabilité (%)	Vul _H (Mm ³)	Rés _H (mois ⁻¹)
-	Référence		88,17	0,184	0,318
	2020		82,80	0,150	0,371
RCP4.5	2050	100%	82,80	0,171	0,365
	2080		80,65	0,179	0,306
	2020		84,41	0,158	0,293
RCP8.5	2050		92,47	0,127	0,423
	2080		78,23	0,173	0,291
	2020		90,32	0,093	0,333
RCP4.5	2050	50%	89,52	0,098	0,385
	2080		90,05	0,106	0,297
	2020		89,52	0,097	0,282
RCP8.5	2050		97,58	0,118	0,333
	2080		90,12	0,114	0,243
	2020		79,30	0,251	0,386
RCP4.5	2050	150%	77,69	0,274	0,352
	2080		75,54	0,291	0,296
	2020		78,76	0,207	0,398
RCP8.5	2050		88,71	0,252	0,440
	2080		73,66	0,292	0,286

7.7.3 Propositions pour une gestion améliorée de l'hydro-système de Boura

Bien que les projections futures des indices de performance puissent avoir un certain degré d'imprécision due aux incertitudes sur les projections climatiques et les méthodes de simulation, ces indices sont néanmoins des outils nécessaires à l'estimation de la capacité d'un réservoir à résister aux pressions des perturbations futures liées au changement climatique et au développement socio-économique. On a observé que le système modélisé de Boura sous les conditions climatiques projetées serait d'autant moins fiable que les demandes en eau agricoles seront de plus en plus importantes. De même la résilience du système baisserait et le système serait plus vulnérable.

Le suivi du comportement de ces indices statistiques peut améliorer les prises de décision relatives à la gestion. A l'issue de nos travaux, nous pouvons dire que dans les conditions climatiques projetées et quel que soit le scénario de développement envisagé, les demandes en eau agricoles ne pourront pas être entièrement satisfaites. Cette situation est due aux fortes variabilités interannuelles des apports au niveau du réservoir. Pour cela, nous préconisons qu'une *stratégie d'irrigation déficitaire* soit appliquée pendant les années de faibles

disponibilités en eau pour réduire l'utilisation de l'eau agricole. Il s'agira de prendre des dispositions pour satisfaire les demandes en eau pour chacune des spéculations (riz, maïs ou tomate) dans leur phase de développement très sensible au déficit d'irrigation. Pendant les autres phases de développement, on pourrait accroître l'intervalle entre les jours d'irrigation. Cette stratégie pourrait permettre d'améliorer la productivité de l'eau agricole sans causer des sévères baisses de rendements.

En plus, d'autres actions pourront être menées pour maintenir un taux de couverture viable en eau agricole. Ces actions se situent à plusieurs niveaux d'intervention. Il s'agira :

- d'accroître l'efficacité du système d'irrigation à travers le respect du calendrier agricole et du mode de distribution de l'eau (tours d'eau par exemple), la limitation des pertes d'eau dans les canaux par l'entretien et la maintenance réguliers du réseau d'irrigation (colmatage des fissures, débouchage et/ou curage des canaux d'irrigation, responsabilisation des usagers) et le gaspillage d'eau par la réhabilitation des digues de protection intérieure au périmètre rizicole et la mise en place des vannettes de distribution de l'eau;
- d'envisager d'autres options de gestion de l'eau qui intègre la valorisation des eaux souterraines en rendant fonctionnel par exemple les puits manuels construits au niveau du périmètre aval du barrage de Boura;
- de prospecter les possibilités de changement de spéculation ou d'association des cultures à travers une recherche des variétés culturales adaptées à la zone, tolérantes à la sécheresse et de cycles courts;
- de réadapter les calendriers culturels en fonction des volumes d'eau qui restent disponibles dans le réservoir en fin de saison des pluies de manière à autoriser une utilisation précoce de l'eau pour la contre-saison ;
- de mettre en place un cadre d'organisation de l'ensemble des usagers de l'eau à travers lequel un comité de gestion pourrait être créé de façon consensuelle pour assurer le bon fonctionnement et la pérennité de l'aménagement (fixation et récupération de redevances hydro-agricoles, transparence dans la gestion des finances);
- de mettre en place des mécanismes opérationnels et participatifs de collecte de données pour capitaliser les tendances d'évolution en matière de disponibilité de l'eau, de la gestion de l'eau, de maintenance de l'ouvrage et d'organisation.

Conclusion partielle du chapitre 7

Le changement climatique projeté au XXI^{ème} siècle à partir des simulations du modèle climatique régional RCA4 ne peut être sans conséquence sur le réservoir de Boura. L'estimation quantitative des impacts sur les variables d'intérêt de la gestion (précipitations, ETP, apports et demandes en eau) est importante pour comprendre et prévenir les problèmes potentiels sur les disponibilités de l'eau du réservoir et leur gestion future.

Comme les simulations brutes de modèles climatiques ont des biais et ne peuvent être directement utilisées dans les études d'impacts, les sorties (précipitations et températures via l'ETP) du modèle RCA4 sont débiaisées afin de construire les scénarios climatiques. Ces données de précipitations et d'ETP corrigées sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR4J et du modèle de demande en eau. On a fait l'hypothèse que le modèle GR4J calibré sur la période de suivi hydrologique 2012-2014 restera valable en climat modifié et peut donc être utilisé pour simuler les apports aux horizons futurs et reconstituer les écoulements de la période de référence. En supposant aussi que le couvert végétal et l'utilisation des sols n'évolueront pas d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, les volumes de demande en eau sont estimés pour les horizons futurs. Les valeurs de débits et de demandes en eau simulées pour les périodes futures sont comparées à celles reconstituées à la période de référence pour évaluer les changements en termes de pourcentage.

Globalement, les variations des écoulements suivent largement celles des précipitations malgré une croissance continue de l'ETP jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle. Les taux de variation des écoulements moyens annuels aux trois horizons (2020, 2050 et 2080) fluctuent entre +30% et +130% selon le scénario RCP et l'horizon considérés. Ces variations s'accompagneront d'une modification du régime des écoulements aux horizons 2020 et 2050 comparés aux écoulements reconstitués. On projette aussi une augmentation des volumes moyens annuels de demande en eau de l'ordre de +2% à +23%.

Cette étude fournit une base pour la gestion et la planification future des volumes d'eau disponibles du réservoir de Boura. Pour cela, trois types de scénarios sont élaborés et évalués pour la gestion efficace du réservoir. Les simulations ont montré que des déficits importants de demande en eau pourront se produire aux horizons futurs. Il en est de même du stockage du réservoir qui pourrait atteindre parfois un état critique (assèchement total). Compte tenu du comportement monotone, la fiabilité et la vulnérabilité peuvent être considérées comme des indicateurs appropriés d'évaluation de la performance des réservoirs.

CHAPITRE 8 : CONCLUSION GÉNÉRALE – PERSPECTIVES



Les petits barrages sont des sources d'eau très importantes pour l'atteinte de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. Leur édification permet de stocker de l'eau pendant les périodes d'abondance (saison des pluies) pour en disposer pendant les périodes de rareté (saison sèche). Ces ouvrages sont exploités à diverses fins (irrigation, abreuvement du bétail, pêche et aquaculture).

Cette étude développée dans le cadre du programme de recherche « Challenge Program Water and Food (CPWF) » du bassin de la Volta, constitue un apport additionnel et appréciable au développement des outils de gestion durable des systèmes hydrauliques, en particulier les petits réservoirs, avec un accent sur leur fonctionnement. Le travail a été organisé autour de quatre points :

- établir le bilan hydrologique du réservoir de Boura à partir d'une échelle temporelle adéquate : quantifier/estimer les différentes composantes du bilan en prenant en compte les incertitudes sur les variables mesurées;
- caractériser l'hydrologie du bassin versant non jaugeé en amont du barrage de Boura : modéliser les transformations pluie-débit de ce bassin;
- élaborer un outil d'aide à la gestion optimisée du réservoir de Boura qui puisse être exploitable et exportable dans des environnements similaires;
- évaluer les impacts du changement et de la variabilité climatiques futurs sur les indices de performance du réservoir de Boura.

8.1 Synthèse des résultats

Bilan hydrologique du réservoir de Boura sur la période de suivi

Comme beaucoup de barrages de la région, l'ouvrage de Boura, depuis sa construction en 1983, n'a fait l'objet d'aucun suivi hydrologique. Le bilan hydrologique réalisé a permis de caractériser le fonctionnement actuel de l'hydro-système de Boura à partir de la détermination des différents flux entrants et sortants du système. Le bilan global sur la période du suivi hydrologique a indiqué que : de l'eau mobilisée par le réservoir (9,23 Mm³), 60% s'évaporent, 24% s'infiltrent et 19% sont prélevés pour satisfaire les demandes en particulier les demandes d'irrigation. On peut affirmer que le réservoir de Boura est effectivement sous-exploité ; il est plus un bac évaporatoire qu'une masse d'eau destinée aux usages. Il est donc concevable d'accroître l'exploitation de ces petits réservoirs en intensifiant les usages (il s'agirait d'utiliser plus d'eau surtout en début de la saison sèche). L'analyse des termes du

bilan du réservoir de Boura a révélé de fortes incertitudes sur les volumes infiltrés et les volumes prélevés. De même, une grande variabilité du régime hydrique du barrage de Boura est observée. Cette variabilité est principalement due aux irrégularités des apports qui sont contrôlés par la pluviométrie. En effet, le coefficient de remplissage a été de 2,3 pour la saison 2012/2013 et seulement de 0,7 pour la saison 2013/2014. Ainsi, dans un cadre de gestion à avenir incertain, un effort sera consenti sur les règles de gestion (répartition entre usagers et distribution temporelle de l'eau). Cette étude nous a permis d'établir la situation actuelle de l'exploitation du réservoir et d'avoir des connaissances sur le fonctionnement hydrologique du système de Boura. Elle constitue en ce sens la première étape vers une gestion que nous pouvons espérer plus rationnelle.

Caractérisation hydrologique du bassin versant en amont du barrage de Boura

Le fonctionnement hydrologique du bassin versant en amont du barrage de Boura se caractérise par un régime hydrologique non permanent avec des écoulements continus sur la période de mi-juillet à début octobre (période sans ou avec peu d'écoulement d'octobre à juin). D'autre part, malgré l'absence des données de débits sur le bassin, l'examen des chroniques de mesures limnimétriques a permis de reconstituer les apports du bassin versant à travers le bilan hydrologique du réservoir établi sur la période de suivi. Les coefficients d'écoulement annuel du bassin du barrage de Boura varient entre 3 et 6%. Une forte sensibilité du bassin versant aux variations des précipitations a été observée. En effet, une baisse de 6% des précipitations en 2014 par rapport à 2012, malgré une faible augmentation de l'évaporation (inférieure à 5%) a conduit à une diminution des écoulements de l'ordre de 37%. Les apports reconstitués ont servi comme des observations à la mise en œuvre du modèle hydrologique GR4J. En effet, le calage de ce modèle a permis d'obtenir un jeu de paramètres permettant de simuler de façon pertinente l'hydrogramme des apports journaliers à la retenue de Boura. Le modèle GR4J ainsi calibré a permis de simuler les apports du bassin sous climat futur.

Les petits réservoirs seraient susceptibles de fournir des informations sur des bassins non jaugés presque équivalentes à celles que l'on pourrait tirer des stations classiques des réseaux hydrométriques. Pour cela, il faudrait qu'en plus des chroniques de mesures limnimétriques, qu'on puisse disposer à proximité de ces ouvrages de dispositifs de mesure des précipitations (pluviomètre) et de l'évaporation (bac évaporatoire).

Elaboration d'un outil d'aide à la gestion optimale des petits réservoirs

Comme pour beaucoup d'ouvrages dans la région, la ressource en eau du réservoir de Boura est principalement utilisée pour satisfaire les besoins agricoles, les autres usages (cheptel, domestiques, pêche, etc.) étant secondaires. Les performances sous-optimales des aménagements en aval de ces ouvrages traduisent une faible valorisation des ressources en eau des petits réservoirs à travers l'agriculture irriguée. En effet, les rendements moyens des cultures telles que le riz et la tomate sont estimés respectivement à 3,7 tonnes/ha et 8,6 tonnes/ha. Ces rendements sont relativement faibles comparativement à ce que l'on peut observer ailleurs (par exemple en Asie). C'est pour cela, qu'un outil de gestion pourrait permettre d'optimiser la valorisation des ressources en eau disponibles.

Nous avons tout d'abord proposé un modèle simple des besoins en eau des cultures et établi des relations caractéristiques de certaines variables d'intérêt de la gestion avec les volumes stockés. Par la suite, un modèle de gestion optimale des barrages a été développé. Cet outil de gestion baptisé « OPTIWAM » repose sur une optimisation sous contrainte des fournitures en eau à partir des sources d'eau de surface et souterraine. L'optimisation a consisté à déterminer la meilleure combinaison des variables de décision (fournitures en eau) qui respecte les objectifs de gestion fixés (satisfaire la demande en eau, garantir une réserve écologique, améliorer la productivité de l'eau, maintenir l'équilibre de l'aquifère, réduire le coût unitaire de l'eau) et les contraintes du système. Une approche basée sur un algorithme génétique mono-objectif déterministe (variables d'intérêt de la gestion connues) à codage réel a été utilisée pour résoudre ce problème d'optimisation. L'application de cet outil de gestion au cas réel du système modélisé de Boura au pas de temps mensuel a montré sa robustesse à produire les résultats satisfaisants et son efficacité de calcul en termes de temps d'exécution. Pour assurer une gestion efficace des petits réservoirs les objectifs et les priorités de développement doivent être évalués et définis de manière consensuelle. La performance de l'outil d'optimisation dépend fortement de la qualité des données en entrée.

Caractérisation de l'impact des variabilités climatiques sur les apports du bassin versant en amont du barrage de Boura et les besoins agricoles

Dans un premier temps, nous avons évalué la gamme de variation des paramètres climatiques (pluie et ETP) aux horizons d'intérêt choisis (2020, 2050 et 2080) par rapport à la période de référence 1971-2000. L'évolution du climat à l'échelle locale du bassin versant de Boura selon les données corrigées de sortie du modèle climatique RCA4 (sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5) se caractérise par une variation relative de la pluie annuelle dans la gamme de

+1% à +23% en comparaison à la moyenne de la période de référence 1971-2000. De même, une hausse de l'ETP annuelle est projetée jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle. Ainsi, la gamme de variation de l'ETP annuelle est de l'ordre de +1% et +9% (en comparaison avec la période 1971-2000). Ces variations de l'ETP, relativement faibles à l'horizon 2020, atteignent leurs pics à l'horizon 2080.

Dans un second temps, nous supposons que le changement climatique projeté au XXI^{ème} siècle ne peut être sans conséquence sur la retenue de Boura. L'estimation quantitative des impacts sur les variables d'intérêt de la gestion (apports et demandes en eau) est importante pour comprendre et prévenir les problèmes potentiels sur les disponibilités de l'eau du réservoir et leur gestion future. Les simulations hydrologiques avec le modèle GR4J montrent globalement que les variations des écoulements sur le bassin suivent largement celles des précipitations malgré une croissante continue de l'ETP jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle. La variation relative des écoulements moyens annuels aux trois horizons (2020, 2050 et 2080) fluctuent entre +30% et +130% selon le scénario RCP et l'horizon considérés. Ces variations s'accompagneront d'une modification du régime des écoulements aux horizons 2020 et 2050 comparés aux écoulements reconstitués. On projette aussi une augmentation des volumes moyens annuels de demande en eau agricole de l'ordre de +2% à +23%.

Evaluation de l'impact du changement climatique sur les indices de performance de la retenue de Boura

Nous avons examiné à partir d'une approche par simulation (en utilisant l'outil WEAP), l'impact du changement climatique sur les indices de performance du réservoir de Boura à satisfaire les demandes en eau agricoles aux horizons futurs (2020, 2050 et 2080). Pour chacun des trois scénarios de développement envisagés, la performance du système est estimée à travers un critère qualitatif (courbe de stock du réservoir) et trois critères quantitatifs (fiabilité, résilience et vulnérabilité). Les résultats ont montré que des déficits importants de demande en eau pourront se produire aux horizons futurs. Il en est de même du stockage du réservoir qui pourrait atteindre parfois un état critique (assèchement total). On a projeté que le système modélisé de Boura serait d'autant moins fiable que les demandes en eau agricoles seront de plus en plus importantes. De même la résilience du système baisserait et le système serait plus vulnérable. Il ressort également que plus le système est fiable, plus il est sensible aux défaillances (vulnérabilité élevée).

Bien que les projections futures des indices de performance puissent avoir un certain degré d'imprécision due aux incertitudes sur les projections climatiques et les méthodes de

simulation, ces indices sont des outils robustes nécessaires à l'estimation de la capacité d'un système modélisé à gérer les perturbations futures liées au changement climatique et au développement socio-économique. De plus, des propositions ont été faites pour une gestion améliorée de l'hydro-système de Boura sous les conditions climatiques projetées et les scénarios de développement envisagés. Il s'agit par exemple qu'une pratique *d'irrigation déficitaire* soit appliquée pendant les années de faibles disponibilités en eau pour réduire l'utilisation de l'eau agricole.

8.2 Perspectives de recherche

Les travaux accomplis et les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives de recherche pour le développement durable des systèmes hydrauliques. Ces nouvelles ouvertures se subdivisent en cinq principaux points :

Acquisition des données du système de gestion

L'étude s'est limitée à l'échelle d'un réservoir non suivi. Le manque des données historiques sur le fonctionnement du réservoir et sur les usages de l'eau, peut entraîner des biais importants sur les composantes du bilan hydrologique et des dérives au niveau des sorties du modèle d'optimisation de la gestion. La détermination des différents termes du bilan hydrologique du réservoir de Boura s'est reposée uniquement sur des mesures limnimétriques, pluviométriques et de lames évaporées sur bac. Pour des études similaires, les plans d'eau devront être équipés par d'autres dispositifs tels que les bacs flottants dont le suivi permettrait de dégager des coefficients de transposition locaux mensuels entre l'évaporation sur bac (bac "Colorado" ou bac "Classe A") et celle du plan d'eau. Ces coefficients permettront de limiter les erreurs sur l'estimation des pertes par évaporation au niveau du plan d'eau. De même, des mesures piézométriques autour des réservoirs devraient également permettre une meilleure caractérisation des échanges entre la retenue et la nappe sous-jacente. Il serait également important d'effectuer des levés topographiques et bathymétriques afin de mettre régulièrement à jour les caractéristiques morphologiques de la cuvette du barrage.

L'estimation des volumes prélevés surtout pour l'irrigation en aval du barrage de Boura a été très approximative. Il serait souhaitable, pour les études à venir, d'équiper les vannes des compteurs volumétriques pour avoir une mesure précise des volumes soutirés. Ainsi, l'efficacité du système pourrait être mieux évaluée. La caractérisation physico-chimique permettrait d'apprécier la qualité des eaux du réservoir surtout en termes de salinité pour son usage agricole.

Compréhension des processus de transfert des flux hydriques

D'autres approches, notamment les approches géochimiques pourraient permettre d'approfondir les connaissances sur la dynamique du système (vidange du réservoir). Ainsi, l'application des méthodes isotopiques permettrait d'une part, de mieux caractériser les interactions entre l'atmosphère et le plan d'eau (flux évaporatoire) et d'autre part, d'appréhender les relations de surface-souterrain du système réservoir de Boura (transfert hydrique entre le réservoir et la nappe sous-jacente. Les résultats de ces approches (taux d'évaporation du plan d'eau et taux de recharge de la nappe) pourraient être confrontés à ceux obtenus à partir de la méthode du bilan d'eau du réservoir.

Amélioration du modèle de gestion du système des ressources en eau

L'outil de gestion proposé constitue une première étape. Des améliorations pourront être faites en termes de formulation du problème et de la méthodologie de résolution. On pourrait par exemple intégrer un objectif relatif à l'aspect qualité de l'eau. Le modèle des demandes en eau agricoles est trop simplifié. Une modélisation plus fine des demandes en eau agricoles par exemple avec le module MABIA intégré dans l'outil WEAP (Jabloun & Sahli, 2012) permettrait de faire une meilleure scénarisation de l'évolution des demandes en eau agricoles. La résolution multi-objectif du problème est une option prometteuse conduisant à plus de souplesse dans la prise de décision. Par conséquent, il serait plus pertinent d'appliquer les **approches Pareto** pour résoudre le problème multi-objectif formulé (application des AGs multi-objectifs).

On pourrait également s'intéresser à l'utilisation efficiente des potentiels d'eau disponibles des petits barrages à travers un développement optimal des aménagements autour de ces ouvrages (Azamathulla et al., 2008). Ainsi, les surfaces optimales à équiper en réseau d'irrigation pourront être déterminées en couplant les outils de conception optimale du système et de gestion optimale du réservoir.

Afin d'avoir une approche régionale de gestion des ouvrages hydrauliques, il serait intéressant d'appliquer l'outil gestion développé « OPTWAM » à d'autres petits réservoirs au Burkina Faso et en Afrique.

Prise en compte des incertitudes dans la chaîne de modélisation

A toutes les étapes des études d'impact du changement de climat, de la génération des scénarios d'émission de GES, aux modèles d'impact (modèles hydrologique et usages) en passant par les simulations climatiques et la désagrégation, des incertitudes existent et peuvent se compenser, s'accumuler ou même se multiplier (Harding et al., 2012; Paturel,

2014). La prise en compte des multiples incertitudes qui surviennent est une difficulté majeure pour ces études. Nous pensons que ces incertitudes doivent être explorées. Il serait donc intéressant dans une étude similaire d'examiner et de quantifier les incertitudes associées à l'ensemble de la chaîne de simulation sous climat futur.

Prise en compte d'autres RCMs et scénarios de changement climatique

Le changement climatique dans cette étude est évalué au moyen du modèle climatique régional RCA4 initialisé et forcé par le modèle global MPI-ESM-LR. Dans le but d'explorer l'amplitude de variations des impacts potentiels sur les variables d'intérêt de la gestion, il serait intéressant d'utiliser les sorties d'autres modèles régionaux avec les mêmes profils de concentration de gaz à effet de serre notamment, les simulations régionales issues des expérimentations CORDEX. Il serait également intéressant d'évaluer les gammes de variations des variables d'intérêt sous d'autres profils de concentration RCPs tels que RCP 2.6 et RCP 6.0.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdellaoui B., Merzouk A., Aberkan M., & Albergel J. (2002), Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, **15**, (4), 737–748.
- Abdellaoui B., Merzouk A., Pépin Y., Aberkan M., & Albergel J. (2009), Simulation du bilan hydro-sédimentaire d'un barrage collinaire en zone marneuse Méditerranéenne (Cas du barrage Saboun, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, **22**, (4), 487–504.
- Abdullah M.A. (2012), A goal programming algorithm to incorporate the Columbia River non-power flow requirements in the Columbia River treaty model. Master thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 114p.
- Abteu Wossenu P.E. (2001), Evaporation estimation for Lake Okeechobee in South Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **127**, 140–147.
- Adeyemo J.A. (2011), Reservoir operation using multi-objective evolutionary algorithms-A review. *Asian Journal of Scientific Research*, **4**, (1), 16–27.
- Adwubi A., Amegashie B.K., Agyare W.A., Tamene L., Odai S.N., Quansah C., & Vlek P. (2009), Assessing sediment inputs to small reservoirs in Upper East Region, Ghana. *Lakes & Reservoirs: Research and management*, **14**, 279–287.
- Ahmed J. & Sarma A. (2005), Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water resources management*, **19**, 145–161.
- Aich V., Liersch S., Vetter T., Huang S., Tecklenburg J., Hoffmann P., Koch H., Fournet S., Krysanova V., Müller E.N., & Hattermann F. (2014), Comparing impacts of climate change on streamflow in four large African river basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, 1305–1321.
- Alam M.M. (2011), Statistical Downscaling of Extremes of Precipitation in Mesoscale Catchments from Different RCMs and Their Effects on Local Hydrology. Doctoral thesis, Universität Stuttgart, Germany, 240p.
- Alander J.T. (1992), On optimal population size of genetic algorithms. In *CompEuro 92. Computer Systems and Software Engineering*, IEEE, pp. 65–70.
- Alazard M. (2013), Etude des relations surface – souterrain du système aquifère d' El Haouareb (Tunisie Centrale) sous contraintes climatiques et anthropiques. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France, 376p.
- Alemu E.T., Palmer R.N., Polebitski A., & Meaker B. (2011), Decision Support System for Optimizing Reservoir Operations Using Ensemble Streamflow Predictions. *Journal of Water resources planning and management*, **137**, (1), 72–82.
- Al-fares W. (2011), Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria. *Journal of Applied Geophysics*, **75**, (3), 464–471.
- Ali S., Ghosh N.C., & Singh R. (2008), Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region, India. *Hydrological processes*, **22**, 1093–1106.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., & Smith M. (1998), Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements- FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *FAO*, Rome, Italy, 326p.
- Amri R. (2013), Estimation régionale de l'évapotranspiration sur la plaine de Kairouan (Tunisie) à partir de données satellites multi-capteurs. Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier (France)/ Université de Cartage (Tunisie), 195p.
- Andersson L., Samuelsson P., & Kjellström E. (2011), Assessment of climate change impact on water resources in the Pungwe river basin. *Tellus*, **63A**, 138–157.
- Andreassian V., Perrin C., & Michel C. (2004), Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, **286**, (1–4), 19–35.

- Andreini M., Schuetz T., Senzanje A., Andah W., Cecchi P., Bolee E., De Giesen V., Kemp-benedikt E., & Liebe J. (2009), CPWF project number 46 report: Small multi-purpose reservoir ensemble planning. CGIAR Challenge Program on Water and Food Project Report series, 55p.
- Antonino A.C.D., Angulo-Jaramillo R., Hammecker C., Netto A.M., Montenegro S.M.L.G., Lira C.A.B.O., & Cabral J.J.S.P. (2004), A simplified water transfer model of the reservoir–ebb tide system, including preferential flow, in the semi-arid region in Northeastern Brazil. *Journal of Hydrology*, **287**, 147–160.
- Ardoin-Bardin S. (2004), Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France, 440p.
- Asefa T., Clayton J., Adams A., & Anderson D. (2014), Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability , Resilience , Vulnerability and beyond. *Journal of Hydrology*, **508**, 53–65.
- Ashofteh P.S., Haddad O.B., & Mariño M.A. (2012), Climate Change Impact on Reservoir Performance Indexes in Agricultural Water Supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **139**, (2), 85–97.
- Assani A.A., Buffin-Bélanger T., & Roy A.G. (2002), Analyse d’impacts d’un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l’Eau*, **15**, 557–577.
- Azamathulla H., Wu F., Ab A., Sandeep M.N., Nor A.Z., & Chun K.C. (2008), Comparison between genetic algorithm and linear programming approach for real time operation. *Journal of hydro-environment Research*, **2**, 172–181.
- Back T., Fogel D.B., & Michalewicz T. (2000), *Evolutionary Computation 1: Basic algorithms and operators*. CRC Press, United Kingdom.
- Baptiste F. (2013), Gestion optimale d’un réservoir hydraulique multiusages et changement climatique. Modèles, projections et incertitudes Application à la réserve de Serre-Ponçon. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 301p.
- Barbier B., Dembélé Y., & Compaoré L. (2006), L’eau au Burkina Faso: usages actuels et perspectives. *Sud Sciences and Technologies*, **14**, 20–29.
- Barbier B., Yacouba H., Maiga A.H., Mahé G., & Paturel J.E. (2009), Le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l’Ouest: les perspectives et les enjeux. *Géocarrefour*, **84**, (1-2), 31–41.
- Bárdossy A. & Pegram G. (2011), Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, **47**, W04505.
- Barichard V. (2003), Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs. Thèse de doctorat, Université d’Angers, France, 162p.
- Barry B., Obuobie E., Andreini M., Andah W., & Pluquet M. (2005), The Volta River basin. Comparative study on river basin development and management. Report, 187p.
- Bazargan J., Hashemi H., Mousavi S.M., & Sabzi H.Z. (2011), Optimal Operation of Single-Purpose Reservoir for Irrigation Projects under Deficit Irrigation Using Particle Swarm Algorithms. *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering*, **2**, (7), 164–171.
- BCEOM (1979), Barrage de retenue de Boura. Rapport technique, 83p.
- Biasutti M. (2013), Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, (4), 1613–1623.
- Birner R., Schiffer E., Asante F., Gyasi O., & McCarthy N. (2005), Analysis of Governance Structures for Water Resources Management in the White Volta Basin Ghana. Final report, IFPRI, Washington DC, USA, 57p.
- Boe J. (2007), Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, France, 278p.
- Boé J., Terray L., Habets F., & Martin E. (2007), Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, **27**, 1643–1655.

- Boelee E., Cecchi P., & Koné A. (2009), *Health Impacts of Small Reservoirs in Burkina Faso*. IWMI, Colombo, Sri Lanka, 50p.
- Boussaïd I. (2013), Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue. Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil, France, 176p.
- Boyer C., Chaumont D., Chartier I., & Roy A.G. (2010), Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, **384**, 65–83.
- Brunel J.P. & Bouron B. (1992), *Evaporation des nappes d'eau libre en Afrique sahélienne et tropicale*. Rapport technique ORSTOM, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, 413p.
- BUNASOLS (1993), Etude pédologique de l'aval du barrage de Boura. Rapport technique, 41p.
- Bunn S.E. & Arthington A.H. (2002), Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environmental management*, **30**, (4), 492–507.
- Cai W., Zhang L., Zhu X., Zhang A., Yin J., & Wang H. (2013), Optimized reservoir operation to balance human and environmental requirements: A case study for the Three Gorges and Gezhouba Dams, Yangtze River basin, China. *Ecological Informatics*, **18**, 40–48.
- Cai X., Asce M., Mckinney D.C., Asce A.M., & Lasdon L.S. (2003), Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management. *Journal of water resources planning and management*, **129**, (1), 4–17.
- Cao J.Y. & Wu Q.H. (1999), Teaching genetic algorithm using Matlab. *International Journal of Electrical and Engineering Education*, **36**, 139–153.
- Castelletti A., Pianosi F., & Soncini-sessa R. (2008), Water reservoir control under economic, social and environmental constraints. *Automatica*, **44**, 1595–1607.
- CEA-AO (2009), Rapport sur les conditions économiques et sociales en Afrique de l'Ouest en 2008 et 2009, 61p.
- Cecchi P. (2006), Les Petits Barrages au Burkina Faso: un vecteur du changement social et de mutations des réalités rurales. Pre forum mondial de l'eau, IRD, 12p.
- Cecchi P. (2007), *L'eau en partage. Les petits barrages de Côte d'Ivoire*. IRD éditions, Paris, France.
- Cecchi P., Gourdin F., Koné S., Corbin D., Etienne J., & Casenave A. (2009a), Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire: Inventaire et potentialités hydrologiques. *Sécheresse*, **20**, (1), 112–122.
- Cecchi P., Meunier-Nikiema A., Moiroux N., & Sanou B. (2009b), Towards an Atlas of Lakes and Reservoirs in Burkina Faso. Small Reservoirs toolkit, 23p.
- Cecchi P., Poussin J.-C., Gonzalez C., Soleri R., Spinelli S., Diakité C., Fowe T., Karambiri H., Sanou K., Napon K., Bamba D., Sanogo S., Fusillier J.-L., & Jamin J.-Y. The invasion of a West African small reservoir by the macrophyte *Ceratophyllum submersum*: how a weed became a seed. *Hydrobiologia*, (Submitted), .
- CEDEAO-CSAO/OCDE (2008), Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest. *Série environnement. Le climat et les changements climatiques*, 13p.
- Celeste A.B. & Billib M. (2009), Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Advances in Water Resources*, **32**, (9), 1429–1443.
- Celeste A.B. & Billib M. (2010), The Role of Spill and Evaporation in Reservoir Optimization Models. *Water Resources Management*, **24**, (4), 617–628.
- Chandra S., Dewandel B., Dutta S., & Ahmed S. (2010), Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. *Journal of Applied Geophysics*, **71**, (4), 137–148.
- Chang L., Chang F., Wang K., & Dai S. (2010), Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *Journal of Hydrology*, **390**, (1-2), 66–74.
- Chen L., McPhee J., & Yeh W.W. (2007), A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advances in Water Resources*, **30**, 1082–1093.
- Chen Q., Chen D., Han R., Li R., Ma J., & Blanckaert K. (2012), Optimizing the operation of the Qingshitan Reservoir in the Lijiang River for multiple human interests and quasi-natural flow maintenance. *Journal of Environmental Sciences*, **24**, (11), 1923–1928.

- Chen Q., Chen D., Li R., Ma J., & Blanckaert K. (2013), Adapting the operation of two cascaded reservoirs for ecological flow requirement of a de-watered river channel due to diversion-type hydropower stations. *Ecological Modelling*, **252**, 266–272.
- Cherlet J. & Venot J. (2013), Structure and agency: understanding water policy changes in West Africa. *Water Policy*, **15**, 479–495.
- Choi S.-U., Yoon B., & Woo H. (2005), Effects of dam-induced flow regime change on downstream river morphology and vegetation cover in the Hwang River, Korea. *River Research and Applications*, **21**, (2–3), 315–325.
- Christensen J.H., Carter T.R., & Rummukainen, M. Amanatididis G. (2007), Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, **81**, (1), 1–6.
- Clarke L., Edmonds J., Jacoby H., Pitcher H., Reilly J., & Richels R. (2007), CCSP synthesis and assessment product 2.1, Part A: Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. *US Government Printing Office, Washington DC*, 154p.
- Coello Coello C.A. (2001), A short tutorial on evolutionary multiobjective optimization. In *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Springer-Verlag, San Pedro Zacatenco, Mexico, pp.21–40.
- Coello Coello C.A., Van Veldhuizen D.A., & Lamont G.B. (2002), *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Kluwer Academic Publishers, Springer, New York, USA.
- Collette Y. & Siarry P. (2002), Les méthodes scalaires. In *Optimisation multiobjectif*. Groupes Eyrolles, pp.47–80.
- Collier M., Webb R., & Schmidt J. (1996), *Dams and rivers – A Primer on the Downstream Effects of Dams*. US Dept. of the Interior, US Geological Survey.
- Compaoré P. (2011), Participation des populations au diagnostic agricole: Cas du petit barrage de Boura au Burkina Faso. Mémoire de Master 2, Fondation 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, 65p.
- De Condappa D., Chaponnière A., & Lemoalle J. (2009), A decision-support tool for water allocation in the Volta Basin. *Water International*, **34**, (1), 71–87.
- Cooren Y. (2008), Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. Thèse de doctorat, Université Paris 12 Val de Marne, France, 145p.
- Cubasch U., Wuebbles D., Chen D., Facchin M.C., Frame D., Mahowald N., & Winther J.-G. (2013), Introduction. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley), pp. 42. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Dabiré I. (2011), Aspect institutionnel de la gestion des retenues d'eau au Burkina Faso: Cas de la retenue d'eau de Boura dans la province de la Sissili. Mémoire de Master 2, Fondation 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, 73p.
- Davis T.E. & Principe J.C. (1991), A simulated annealing like convergence theory for the simple genetic algorithms. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithm*. Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos CA, pp.174–181.
- Dawson C.W., Abraham R.J., & See L.M. (2007), HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, **22**, (7), 1034–1052.
- Deb K. (2001), *Multi-Objective Optimisation using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, West Sussex, England, UK.
- Deb K. (2011), *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*. KanGAL report number 2011003, pp.3–34.
- Degoutin F. (2002), Problèmes bi-objectifs en optimisation combinatoire et capacité d'infrastructures ferroviaires. Mémoire de recherche de DEA, Université de Valenciennes, France, 62p.

- Dembelé Y. & Somé L. (1991), Propriétés hydrodynamiques des principaux types de sol du Burkina Faso. in: Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone, (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991) *IAHS Publication* **199**,(357), 217–227.
- Déqué M. (2007), Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, 16–26.
- Desconnets J.C., Diallo A., Traore O., Chene J.M., & Morin G. (1998), Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU: évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso. *IAHS Publication*, **252**, 375–385.
- Desconnets J.C., Taupin J.D., Lebel T., & Leduc C. (1997), Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. *Journal of Hydrology*, **189**, 155–178.
- Descroix L., Mahé G., Lebel T., Favreau G., Galle S., Gautier E., Olivry J., Albergel J., & Amogu O. (2009), Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, **375**, (1-2), 90–102.
- Dingman S.L. (1994), *Physical Hydrology*. Macmillan, New York, USA.
- Dittmann R., Froehlich F., Pohl R., & Ostrowski M. (2009), Optimum multi-objective reservoir operation with emphasis on flood control and ecology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1973–1980.
- Döll P. (2002), Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, **54**, 269–293.
- Doorenbos J. & Pruitt W.O. (1977), Background and development of methods to predict reference crop evapotranspiration (ET_o) Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage paper No. 24, Rome Italy, 144p.
- Dréo J., Petrowski A., Siarry P., & Taillard E. (2003), *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile: Recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis*. Eyrolles, Paris, France.
- Dupeyrat A., Agosta C., Sauquet E., & Hendrickx F. (2008), Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux - le cas de la Garonne. In *Proceedings 13th IWRA World Water Congress*, 15p.
- Dupriez H. & De Leener P. (1987), *Jardins et vergers d'Afrique*. Terres et Vie, Harmattan, Bruxelles.
- Edijatno (1991), Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, France, 242p.
- Edijatno, Nascimento N.O., Yang X., Makhlof Z., & Michel C. (1999), GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, **44**, (2), 263–277.
- Elsawwaf M., Willems P., & Feyen J. (2010), Assessment of the sensitivity and prediction uncertainty of evaporation models applied to Nasser Lake, Egypt. *Journal of Hydrology*, **395**, (1-2), 10–22.
- Evans A.E.V., Giordano M., & Clayton T. (2012), Investing in agricultural water management to benefit smallholder farmers in Burkina Faso. IWMI, Colombo, Sri Lanka, 34p.
- Fang X.Z., Voron B., & Bocquillon G. (1989), Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation. *Hydrological Sciences Journal*, **34**, (4), 415–424.
- Fang Z.X. (1988), Gestion de barrages réservoirs à buts multiples. Méthologie et pratiques de la programmation dynamique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et techniques du Languedoc, France, 183p.
- FAO (1996), *Crue et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugeés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche*. Irrigation et Drainage No. 54, Rome, Italy.
- FAO (2003), *Investir dans la maîtrise de l'eau en Afrique Sub-Saharienne*.
- FAO/ROA (2001), *Water harvesting in western and central Africa*. FAO Regional Office for Africa, 119p.

- FAO-AQUASTAT (2007), Dams and agriculture in Africa. *Water Development and Management Unit (NRLW). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Viale delle Terme di Caracalla*, **100**, 12.
- FAO-AQUASTAT (2013), Economie, agriculture et sécurité alimentaire au Burkina Faso, 17p.
- Faulkner J.W., Steenhuis T., van de Giesen N., Andreini M., & Liebe J.R. (2008), Water use and productivity of two small reservoir irrigation schemes in Ghana's Upper East Region. *Irrigation and drainage*, **57**, 151–163.
- Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., & Boulain N. (2009), Land clearing , climate variability , and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, **45**, W00A16.
- Fischer G., Tubiello F.N., Velthuizen H. Van, & Wiberg D.A. (2007), Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation , 1990 – 2080. *Technological Forecasting & Social Change*, **74**, 1083–1107.
- Fisher W.F. (2001), Grands barrages, flux mondiaux et petites gens. *Critique Internationale*, **4**, (13), 123–138.
- Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., & Rummukainen, M. Amanatididis G. (2013), Evaluation of Climate Models. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley), pp. 741–824. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- FMI (2009), Perspective Economique régionales: Afrique sub-saharienne. Etudes économiques et financières. Washington DC, USA.
- Fogel D.B. (1995), A Comparison of Evolutionary Programming and Genetic Algorithms on Selected Constrained Optimization Problems. *Simulation*, **64**, (6), 399–406.
- Fowe T., Karambiri H., Paturel J.-E., Poussin J.-C., & Cecchi P. (2015), Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, **152**, 99–109.
- Fowler H.J., Blenkinsop S., & Tebaldi C. (2007), Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological. *International Journal of Climatology*, **27**, 1547–1578.
- Fowler H.J., Kilsby C.G., & O'Connell P.E. (2003), Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Research*, **39**, (8), 1222.
- De Fraiture C., Kouali G.N., Sally H., & Kabre P. (2014), Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, **131**, 212–220.
- Francisci D. (2002), Algorithmes évolutionnaires et optimisation multi-objectifs en data mining. (Rapport de recherche, Laboratoire I3S, Nice SophiaAntipolis, 46p.
- Fromageot A., Cecchi P., Parent F., & Coppetiers Y. (2006), Ruptures économiques sans ruptures sociales: Le maraîchage et la santé des paysanneries sénégalaises entre résilience et vulnérabilité. *Annales de Géographie*, **115**, 49–68.
- Fu G., Liu C., Chen S., & Hong J. (2004), Investigating the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans. *Hydrological processes*, **18**, 2247–2262.
- Garg K.K., Karlberg L., Barron J., Wani S.P., & Rockstrom J. (2012), Assessing impacts of agricultural water interventions in the Kothapally watershed, Southern India. *Hydrological processes*, **26**, 387–404.
- Gartley M.L., George B., Davidson B., Malano H.M., & Garg K.K. (2009), Hydro-economic modelling of the Upper Bhima catchment. In *18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia*, pp.13-17.
- Gbobaniyi E., Sarr A., Sylla B., Diallo I., Kamga A., Browne A., Dosio A., Dhi A., Hewitson B., & Lamptey B. (2014), Climatology, annual cycle and interannual variability of precipitation and

- temperature in CORDEX simulations over West Africa. *International Journal of Climatology*, **34**, (7), 2241–2257.
- Giertz S., Diekkrüger B., & Höllermann B. (2010), Assessment of the current and future water balance of the Ouémé catchment (Benin) for an integrated water resource management by using the WEAP water planning model. EGU, General Assembly Conference Abstracts **12**, 8934.
- Gildemyn E. (2008), Caractérisation des procédés de fabrication de pièces de sécurité automobile. Optimisation multiobjectifs de la mise en forme. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, France, 163p.
- Giorgi F., Jones C., & Asrar G.R. (2009), Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, **58**, (3), 175–183.
- Giuliani M., Galelli S., & Soncini-Sessa R. (2014), A dimensionality reduction approach for many-objective Markov Decision Processes: Application to a water reservoir operation problem. *Environmental Modelling & Software*, **57**, 101–114.
- Gnémé A., Guelbéogo W.M., Riehle M.M., Tiono A.B., Diarra A., Kabré G.B., Sagnon N., & Vernick K.D. (2013), Plasmodium species occurrence, temporal distribution and interaction in a child-aged population in rural Burkina Faso. *Malaria Journal*, **12**, (67), 10–1186.
- Goldberg D.E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman, Boston, MA, USA.
- Goldberg D.E. & Deb K. (1991), A comparative analysis of selection used in Genetic Algorithms Schemes. *Urbana*, **51**, 61801–2996.
- Graham L.P., Andréasson J., & Carlsson B. (2007), Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, **81**, 293–307.
- Grésillon J.M. & Reeb J. (1981), Eléments pour l'appréciation des dépôts solides dans les barrages de Haute Volta. Contribution à l'étude des petits barrages. *Bulletin Technique EIER*, 6p.
- Guehl J.-M. & Soussana J.-F. (2014), Agriculture, Forêts et Ecosystèmes. L'adaptation au changement climatique. *Cahier Spécial pour la Science n°436*, 16–19.
- Güntner A., Krol M.S., Araújo J.C.D.E., & Bronstert A. (2004), Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. *Hydrological Sciences Journal*, **49**, (5), 901–918.
- Gupta H. V., Kling H., Yilmaz K.K., & Martinez G.F. (2009), Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **377**, (1-2), 80–91.
- Gupta H.V., Sorooshian S., & Yapo S. (1999), Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, **4**, (2), 135–143.
- De Haas S. (2010), Hydrologie et choix de sites d'implantation de micro-barrages autour de Léo, Burkina Faso. Rapport du projet Aqua for all, 55p.
- Haj-Rachid M., Bloch C., & Ramdane-CHerif, Wahiba Chatonnay P. (2010), Différents opérateurs évolutionnaires de permutation: sélections, croisements et mutations. Rapport de recherche no RR 2010-07, LIFC, 60p.
- Harding B.L., Wood A.W., & Prairie J.R. (2012), The implications of climate change scenario selection for future streamflow projection in the Upper Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, **9**, 847–894.
- Hargreaves G.H. & Samani Z.A. (1985), Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, **1**, (2), 96–99.
- Harris T. & Hardin J.W. (2013), Exact Wilcoxon signed-rank and Wilcoxon Mann–Whitney ranksum tests. *Stata journal*, **13**, 337–343.
- Hashimoto T., Stedinger J.R., & Loucks P. (1982), Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria. *Water Resources Research*, **18**, (1), 14–20.

- Hashino T., Bradley A., & Schwartz S. (2006), Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **3**, (2), 561–594.
- Haylock M.R., Cawley G.C., Harpham C., Wilby R.O.B.L., & Goodess C.M. (2006), Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: A comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. *International Journal of Climatology*, **26**, 1397–1415.
- Hazrat A., Teang L., Chee K., Eloubaidy A.F., & Foong K.C. (2000), Modeling water balance components and irrigation efficiencies in relation to water requirements for double-cropping systems. *Agricultural Water Management*, **46**, 167–182.
- Hernandez-diaz L., Laprise R., Sushama L., Martynov A., Winger K., & Dugas B. (2013), Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, **40**, 1415–1433.
- Hijioka Y., Matsuoka Y., Nishimoto H., Masui M., & Kainuma M.L.T. (2008), Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering*, **13**, 97–108.
- Holland J.H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Höllermann 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.
- Huang M. & Liang X. (2006), On the assessment of the impact of reducing parameters and identification of parameter uncertainties for a hydrologic model with applications to ungauged basins. *Journal of Hydrology*, **320**, 37–61.
- Hubert P., Carbonnel J.P., & Chaouche A. (1989), Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d’Afrique de l’Ouest. *Journal of Hydrology*, **110**, 349–367.
- Iacona E., Taine J., & Tamain B. (2012), *Les enjeux de l’énergie après Fukushima*. UniverScience, Dunod.
- Ibrahim B. (2012), Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Thèse de doctorat, UPMC (France) et 2iE (Burkina Faso), 250p.
- Ibrahim B., Polcher J., Karambiri H., & Rockel B. (2012), Characterization of the rainy season in Burkina Faso and its representation by regional climate models. *Climate Dynamics*, **39**, (6), 1287–1302.
- IFAD (2009), Republic of Ghana Northern Rural Growth Programme (NRGP). Design document appraisal Vol. 2. Working Papers 1-5. Rome: International Fund for Agricultural Development..
- Iftikhar A. (2009), Optimal control of multiple reservoirs system under water scarcity. Thèse de doctorat, University of the Punjab, Lahore-Pakistan, 353p.
- Ines A.V.M. & Hansen J.W. (2006), Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **138**, 44–53.
- INSD (2008), Recensement général de la population et de l’habitation de 2006. Résultats définitifs. Ouagadougou, Burkina Faso, 52p.
- Iooss B. (2011), Revue sur l’ analyse de sensibilité globale de modèles numériques. *Journal de la Société Française de Statistique*, **152**, (1), 3–25.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IWACO (1989), Etude du bilan d'eau au Burkina Faso - Tome 2: Inventaire des ressources en eau. Ministère de l'Eau, Burkina Faso.
- Jabloun M. & Sahli A. (2012), WEAP-MABIA Tutorial. Report tutorial, 97p.
- Jahangirzadeh A., Akib S., Kamali B., & Rahman S. (2012), Optimal Water Allocation: Sustainable Management of Dam Reservoir. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **72**, 444–446.
- Jain S.K. (2010), Investigating the behavior of statistical indices for performance assessment of a reservoir. *Journal of Hydrology*, **391**, 90–96.
- Jain S.K. & Bhunya P.K. (2008), Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir/Confiance, résilience et vulnérabilité d'un barrage multi-objectifs. *Hydrological Sciences Journal*, **53**, (2), 434–447.
- Jain S.K. & Singh V.P. (2003), *Water resources systems. Planning and management. Developments in Water Science No. 51*. Elsevier B.V.,
- Jenkins M.W., Marques G.F., Lelo F.K., & Miller S.N. (2005), WEAP as a participatory tool for shared vision planning in the River Njoro Watershed in Kenya. In World Water and Environmental Resources Congress. Anchorage, Alaska, ASCE, 13p.
- Jofreh V., Egodawatta P., Barnes P.H., & Goonetilleke A. (2013), Assessing resilience of water resources systems under the impacts of climate change. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference of the International Institute for Infrastructure Renewal and Reconstruction, Risk-informed Disaster Management: Planning for Response, Recovery and Resilience*, QUT, Brisbane, Australia.
- Jones C.G., Giorgi F., & Asrar G. (2011), The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX. An international downscaling link to CMIP5. *Clivar Exchanges N°56*, **16**, (2), 34–40.
- Jorgensen S.E., Loffler H., Rast W., & Straskraba M. (2005), *Lake and reservoir management. Developments in Water Sciences 54*. Elsevier,
- Jothiprakash V., Shanthi G., & Arunkumar R. (2011), Development of Operational Policy for a Multi-reservoir System in India using Genetic Algorithm. *Water Resources Management*, **25**, 2405–2423.
- Jung G., Wagner S., & Kunstmann H. (2012), Joint climate – hydrology modeling: an impact study for the data-sparse environment of the Volta Basin in West Africa. *Hydrology Research*, **43**, (3), 231–248.
- Kampf S.K. & Burges S.J. (2010), Quantifying the water balance in a planar hillslope plot: Effects of measurement errors on flow prediction. *Journal of Hydrology*, **380**, (1-2), 191–202.
- Karambiri H., Garcia Galiano S.G., Giraldo J.D., Yacouba H., Ibrahim B., Barbier B., & Polcher J. (2011), Assessing the impact of climate variability and climate change on runoff in West Africa: the case of Senegal and Nakambe River basins. *Atmospheric Science Letters*, **12**, 109–115.
- Karamouz M., Szidarovszky F., & Zahraie B. (2003), *Water resources systems analysis with emphasis on conflict resolution*. Lewis Publishers Boca Raton, FL, Boca Raton, Florida.
- Kay B.H. (1999), *Water Resources: Health, Environment and Development*. CRC Press, London and New York.
- Khan N.M. & Tingsanchali T. (2009), Optimization and simulation of reservoir operation with sediment evacuation: a case study of the Tarbela Dam, Pakistan. *Hydrological Processes*, **23**, 730–747.
- Khu S.-T. & Madsen H. (2005), Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration. *Water Resources Research*, **41**, (3), W03004.
- Ki T.F., Sankara S.B., Congo M., Bakyono P.D., & Palm E.M.S. (2013), Les agences de l'eau au Burkina Faso. Capitalisation du processus de mise en place. Ministère de l'Eau des Amenagements Hydrauliques et de l'Assainissement, Burkina Faso, 36p.

- Kingumbi A., Besbes M., Bourges J., & Garetta P. (2004), Evaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale. *Revue des Sciences de l'Eau*, **17**, (2), 213–225.
- Kjeldsen T. & Rosbjerg D. (2001), A framework for assessing the sustainability of a water resources system. *IAHS Publication*, **268**, 107–114.
- Kjeldsen T.R. & Rosbjerg D. (2004), Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems / Choix d'estimateurs de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité pour les analyses de risque de systèmes de ressources en eau. *Hydrological Sciences Journal*, **49**, (5), 37–41.
- Klein J.-C. (1967), Etude hydrologique de bassins représentatifs dans le Sud-Est de la Haute-Volta (Région de Manga). Rapport définitif (1963-1965). ORSTOM, 249p.
- Kone Y. (2014), Caractérisation des interactions entre les eaux de surface et la nappe superficielle: Cas de la retenue de Boura au Burkina Faso. Mémoire de Master 2, Fondation 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, 78p.
- Kote S., Ouedraogo I., Donzeau M., Le Metour J., Castaing C., Egal E., Thieblemont D., Tegye M., Guerrot C., Chevremont P., Milesi J.P., Billa M., Itard Y., & Ki J.C. (2003), Notice explicative de la Carte géologique du Burkina Faso à 1/200 000; Feuille NC-30-XXII Léo. Rapport projet SYSMIN. Ministère des Mines, des Carrières et de l'Energie, Burkina Faso, 70p.
- Koussoubé Y. (1996), Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga). Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 263p.
- Koza J.R. (1992), *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT press,
- Krimil F. (2009), Essai de modélisation de la gestion du barrage de Foug el Gherza (W. de Biskra). Mémoire de Magister, Université colonel El Hadj Lakhdar de Batna, République Algérienne Démocratique et Populaire, 130p.
- Kumar D.N., Raju K.S., & Ashok B. (2006), Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **132**, (2), 123–129.
- Kundzewicz Z. & Kindler J. (1995), Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resource systems. *IAHS Publication*, **231**, 217–224.
- Kunstmann H., Jung G., Wagner S., & Clottey H. (2008), Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management. *Physics and Chemistry of the Earth*, **33**, (1-2), 165–174.
- L'Hôte Y., Mahé G., Some B., & Triboulet J.P. (2002), Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000: The drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, **47**, 563–572.
- Labadie J.W. (2004), Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of water resources planning and management*, **130**, (2), 93–111.
- LaBaugh J.W. (1985), Uncertainty in phosphorus retention, Williams Fork Reservoir, Colorado. *Water Resources Research*, **21**, (11), 1684–1692.
- Lacombe G. (2007), Evolution et usages de la ressource en eau dans un bassin versant aménagé semi-aride. Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, France, 306p.
- Lafore J., Flamant C., Giraud V., Guichard F., Knippertz P., Mahfouf J., Mascart P., & Williams E. (2010), Introduction to the AMMA special issue on Advances in understanding atmospheric processes over West Africa through the AMMA field campaigns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **136**, 2–7.
- Lamb P. (1982), Persistence of sub-saharan drought. *Nature*, **299**, 46–47.
- Le Lay M., Galle S., & Saulnier, Georges-Marie Braud I. (2007), Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: A case study in West Africa. *Water Resources Research*, **43**, (7), W07420.

- Leduc C., Bromley J., & Schroeter P. (1997), Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: Some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *Journal of Hydrology*, **189**, 123–138.
- Lee T.M. & Swancar Amy (1997), Influence of Evaporation, Ground Water, and Uncertainty in the Hydrologic Budget of Lake Lucerne, a Seepage Lake in Polk County, Florida. *US Geological Survey water-supply paper (USA)*, 61p.
- Leemhuis C., Jung G., Kasei R., & Liebe J. (2009), The Volta Basin Water Allocation System: assessing the impact of small-scale reservoir development on the water resources of the Volta basin, West Africa. *Advances in Geosciences*, **21**, 57–62.
- Legates D.R. & McCabe G.J. (1999), Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, **35**, (1), 233–241.
- Lenderink G., Buishand A., & van Deursen W. (2007), Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**, (3), 1145–1159.
- Lepagnot J. (2011), Conception de métaheuristiques pour l'optimisation dynamique. Application à l'analyse de séquences d'images IRM. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 163p.
- Leroy Poff N. & Hart D.D. (2002), How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *BioScience*, **52**, (8), 659–668.
- Li J. (1987), Contribution à l'optimisation de la gestion des retenues: Applications particulières de la méthode dite "du Fil Tendue." Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, France, 226p.
- Liebe J., Giesen N. Van De, & Andreini M. (2005), Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment. A case study in the Upper East Region of Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**, 448–454.
- Liebe J.R. (2002), Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East Region of Ghana. Diploma thesis, Universitat Bonn, Germany, 106p.
- Liebe J.R., van de Giesen N., Andreini M., Walter M.T., & Steenhuis T.S. (2009), Determining watershed response in data poor environments with remotely sensed small reservoirs as runoff gauges. *Water Resources Research*, **45**, (7), W07410.
- Ligon F., Dietrich W., & Trush W. (1995), Downstream Ecological Effects of Dams – A geomorphic perspective. *BioScience*, **45**, (3), 183–192.
- Lin Z. (2011), Estimating water budgets and vertical leakages for karst lakes in North-Central Florida (United States) via hydrological modeling. *Journal of The American Water Resources Association*, **47**, (2), 287–302.
- Louati M.H., Benabdallah S., Lebdi F., & Milutin D. (2011), Application of a Genetic Algorithm for the Optimization of a Complex Reservoir System in Tunisia. *Water Resources Management*, **25**, (10), 2387–2404.
- Loucks D.P. & Van Beek E. (2005), *Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to methods, models and applications*. UNESCO, 7, Place de Fontenoy F-75352 Paris 07 SP and WL| Delft Hydraulics, The Netherlands.
- Love D., Van Der Zaag P., Uhlenbrook S., & Owen R.J.S. (2011), A water balance modelling approach to optimising the use of water resources in ephemeral sand rivers. *River Research and Applications*, **27**, 908–925.
- Lowe L.D., Webb J.A., Nathan R.J., Etchells T., & Malano H.M. (2009), Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *Journal of Hydrology*, **376**, 261–274.
- Luchisheva A. (1950), *Practical Hydrology*. Gidrometeoizdat, Leningrad.
- MAH (2012), Mise à jour des données sur les retenues d'eau de surface. Rapport technique, DGRE/MAH, Burkina Faso, 32p.
- MAHRH (2003), Stratégie nationale de développement durable de l'irrigation au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Burkina Faso, 121p.

- MAHRH (2010), Rapport de mise en oeuvre du Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Burkina Faso, 13p.
- Malekmohammadi B., Zahraie B., & Kerachian R. (2011), Ranking solutions of multi-objective reservoir operation optimization models using multi-criteria decision analysis. *Expert Systems With Applications*, **38**, (6), 7851–7863.
- Mann H.B. & Whitney D.R. (1947), On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of mathematical statistics*, **18**, (1), 50–60.
- Maraun D., Wetterhall F., Ireson A.M., Chandler R.E., Kendon E.J., Widmann M., Brienen S., Rust H.W., Sauter T., Venema V.K.C., Chun K.P., Goodess C.M., Jones R.G., Onof C., Vrac M., Office M., & Centre H. (2010), Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, **48**, (3), 1–38.
- Marek T.H., Schneider A.D., Howell T.A., & Ebeling L.L. (1988), Design and construction of large weighing monolithic lysimeters. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **31**, (2), 477–484.
- Marouene B.J. (2010), Résolution d'un problème d'allocation optimale de ressources multiples à l'aide d'un algorithme génétique. Mémoire de Master, Université Laval, Québec, 149p.
- Martinez Alvarez V., Gonzalez-Real M.M., & Molina Martinez J.M. (2007), A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs Application to South Eastern Spain. *Agricultural Water Management*, **92**, 29–40.
- Martínez-Granados D., Maestre-Valero J.F., Calatrava J., & Martínez-Alvarez V. (2011), The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura Basin, SE Spain. *Water Resources Management*, **25**, 3153–3175.
- Martin-Rosales W. & Leduc C. (2003), Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel: l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Géoscience*, **335**, 461–468.
- Mathevet T. (2005), Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463p.
- Mathlouthi M. & Lebdi F. (2008), Evaluation de la fiabilité de gestion d'un barrage réservoir pour des événements secs. *Hydrological Sciences Journal*, **53**, (6), 1194–1207.
- McCartney M. & Smakhtin V. (2010), Water Storage in an Era of Climate Change: Addressing the Challenge of Increasing Rainfall Variability. Blue Paper, IWMI Research Report: Colombo, Sri Lanka.
- McCuen R. (1973), The role of sensitivity analysis in hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, **18**, (1), 37–53.
- Mckinney D.C. & Savitsky A.G. (2003), Basic optimization models for water and energy management. USAID Research Report, 183p.
- McMahon T.A., Adeloye A.J., & Zhou S. (2006), Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, **324**, 359–382.
- McMahon T.A. & Mein R.G. (1978), *Reservoir capacity and yield. Developments in Water Science 9*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Mdemu M.V. (2008), *Water productivity in medium and small reservoirs in the Upper East Region (UER) of Ghana*. Ecology and Development Series N° 59,
- Mdemu M.V., Rodgers C., Vlek P.L.G., & Borgadi J.J. (2009), Water productivity (WP) in reservoir irrigated schemes in the upper east region (UER) of Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **34**, (4-5), 324–328.
- MEE (2000), Ouvrages de mobilisation des ressources en eau. Inventaire et pertinence du suivi. Ministère de l'Environnement et de l'Eau, Burkina Faso, 36p.
- MEE (2001), Gestion Intégrée des Ressources en Eau: Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. Rapport technique, Ministère de l'Environnement et de l'Eau, Burkina Faso, 252p.

- Merdjaoui B. (2006), Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques et approche Pareto des paramètres d'usinage sous contraintes des limitations de production. Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, République Algérienne Démocratique et Populaire, 149p.
- Meselhe E.A., Habib E.H., Oche O.C., & Gautam S. (2009), Sensitivity of conceptual and physically based hydrologic models to temporal and spatial rainfall sampling. *Journal of Hydrologic Engineering*, **14**, (7), 711–720.
- Michel C. (1983), Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche*, **1**, 39–44.
- Mietton M. (1986), Les données de l'érosion sur bassins-versants au Burkina Faso (ex Haute-Volta). *Revue de géographie alpine*, **74**, (1-2), 119–127.
- Milutin D. (1998), Multiunit water resource systems management by decomposition, optimization and emulated evolution: A case study of seven water supply reservoirs in Tunisia. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 201p.
- Milville F. (1991), Etude hydrodynamique et quantification de la recharge des aquifères en climat Soudano-Sahélien: Application à un bassin expérimental au Burkina Faso. In *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian*. IAHS Publication, **199**, 311–328.
- Mishra B.K. & Herath S. (2011), Climate Projections Downscaling and Impact Assessment on Precipitation over Upper Bagmati River basin. In *Proceedings of Third International Conference on Addressing Climate Change for Sustainable Development through Up-Sacling Renewable Energy Technologies*, pp. 275–281.
- Le Moine N., Andréassian V., Perrin C., & Michel C. (2007), How can rainfall–runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments. *Water Resources Research*, **43**, W06428.
- Moradi-Jalal M., Bozorg Haddad O., Karney B.W., & Mariño M.A. (2007), Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Agricultural Water Management*, **90**, 149–159.
- Moriassi 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. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **50**, (3), 885–900.
- Morley M.S., Atkinson R.M., & Walter G. A. (2001), GAnet: genetic platform for pipe optimisation. *Advanced in Engineering Software*, **32**, 467–475.
- Mouelhi S. (2003), Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), France, 323p.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C., & Andréassian V. (2006a), Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, **328**, 283–296.
- Mouelhi S., Michel C., Perrin C., & Andréassian V. (2006b), Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, **318**, (1-4), 200–214.
- Moulin L., Perrin C., Michel C., & Andréassian V. (2005), Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global: application au cas du bassin de la Seine amont. *La Houille blanche*, **5**, 79–87.
- Moy W.-S., Cohon J.L., & Reville C.S. (1986), A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research*, **22**, (4), 489–498.
- Mugabe F.T., Hodnett M.G., & Senzanje a (2003), Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Water Management*, **62**, (2), 149–163.
- Mustapha M.K. (2009), Problems, challenges and management of small, shallow tropical African reservoirs – A case study of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria. *International Journal of Lakes and Rivers*, **2**, (1), 163–174.

- Nandalal K.D.W. & Bogardi J.J. (1996), Reliability analysis of a reservoir for salinity control. *In Proceedings of International Conference on Water Resources and Environment Research: Towards the 21st Century*. Kyoto University, Japan, pp. 263–269.
- Nandalal K.D.W. & Bogardi J.J. (2007), *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits*. Cambridge University Press, Leiden.
- Napon K. (2013), Les petits réservoirs d'eau et leurs effets sur les conditions de vie des ménages: Cas de la retenue de Boura (Province de la Sissili). Mémoire de Master, Université de Koudougou, Burkina Faso, 111p.
- Nascimento N.O. (1995), Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, France, 550p.
- Nash J.E. & Sutcliffe J. V. (1970), River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, (3), 282–290.
- Le Ngo L. (2006), Optimising reservoir operation A case study of the Hoa Binh reservoir, Vietnam. Doctoral thesis, Technical University of Denmark, 50p.
- Le Ngo L., Madsen H., & Rosbjerg D. (2007), Simulation and optimisation modelling approach for operation of the Hoa Binh reservoir, Vietnam. *Journal of Hydrology*, **336**, 269–281.
- Niasse M. (2004), Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l'Ouest. *Vertigo*, **5**, (1), 1–15.
- Nicholson S.E. (1983), Sub-Saharan rainfall in the years 1976–80: Evidence of continued drought. *Monthly weather review*, **111**, (8), 1646–1654.
- Nicola M. (2006), *Development of a water balance for the Atankwidi catchment, West Africa – A case study of groundwater recharge in a semi-arid climate*. Ecology and Development Series N° 41,
- Nikulin G., Jones C., Giorgi F., Asrar G., Buchner M., Cerezo-Mota, R Christensen O., Deque M., Fernandez J., Hansler A., vanMeijgaard, E Samuelsson P., Sylla M., & Sushama L. (2012), Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of climate*, **25**, (18), 6057–6078.
- Nilsson C. & Berggren K. (2000), Alterations of Riparian Ecosystems Caused by River Regulation. *BioScience*, **50**, (9), 783–792.
- Nombre A. (1995), La sécurité des barrages au Burkina Faso. Ougadougou, Burkina Faso, 59p.
- Noori M., Othman F., Sharifi M.B., & Heydari M. (2013), Multiobjective operation optimization of reservoirs using genetic algorithm (Case Study: Ostor and Pirtaghi Reservoirs in Ghezal Ozan Watershed). *In International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, **51**, 49–54.
- Nouiri I. (2007), Optimisation multiobjectif de la chloration dans les réseaux d'alimentation en eau potable par algorithmes génétiques. Thèse de doctorat, Université du 7 Novembre à Carthage/INAT, Tunisie, 185p.
- Nouiri I. (2014), Multi-Objective tool to optimize the Water Resources Management using Genetic Algorithm and the Pareto Optimality Concept. *Water Resources Management*, **28**, 1–17.
- Nouiri I., Lebdi F., & Lamaddalena N. (2005), Algorithme Evolutionnaire (AE) pour l'optimisation des débits sur les réseaux hydrauliques à la demande. *Irrigation systems performance* (ed. by N. Lamaddalena, F. Lebdi, M. Todorovic, and C. Bogliotti), pp. 49–58. CIHEAM, Bari.
- Nouvelot J.-F. (1993), Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. Rapport, ORSTOM, 539p.
- Obeng-asiedu P. (2004), Allocating Water Resources for Agricultural and Economic Development in the Volta River Basin. Doctoral thesis, University of Bonn, Germany, 183p.
- Oblinger J.A., Moysey S.M.J., Ravindrinath R., & Guha C. (2010), A pragmatic method for estimating seepage losses for small reservoirs with application in rural India. *Journal of Hydrology*, **385**, (1-4), 230–237.
- Odada O.E. (2006), Freshwater resources of africa: major issues and priorities. *Global Water News GWSP*, **3**, 1–12.

- Oguntunde P.G. (2004), Evapotranspiration and complementarity relations in the water balance of the Volta Basin: field measurements and GIS-based regional estimates. Doctoral thesis, Cuvillier Verlag, Göttingen, 169p.
- Oguntunde P.G. & Abiodun B.J. (2013), The impact of climate change on the Niger River Basin hydroclimatology, West Africa. *Climate Dynamics*, **40**, 81–94.
- Oliveira R. & Loucks P. (1997), Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, **33**, (4), 839–852.
- Olsson J., Dahné J., Foster K., Södling J., & Yang W. (2012), Bias corrected climate scenarios in CLEO. Research report, SMHI, 19p.
- ONBI (1981), Etude socio-économique d'un projet de construction de barrage à Boura. S/P de Léo, Burkina Faso. Rapport d'étude, 11p.
- Ono I., Kita H., & Kobayashi S. (1999), A robust real-coded genetic algorithm using unimodal normal distribution crossover augmented by uniform crossover: effects of self-adaptation of crossover probabilities. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. Morgan Kaufmann, pp. 496–503.
- Oudin L. (2004), Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), France, 495p.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F., & Loumagne C. (2005), Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall – runoff model? Part 2 — Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall – runoff modelling. *Journal of Hydrology*, **303**, 290–306.
- Oudin L., Perrin C., Mathevet T., Andréassian V., & Michel C. (2006), Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, **320**, 62–83.
- Ouedraogo M. (2001), Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France, 257p.
- Pabiot F. (1999), Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride: projet MERGUSIE. Mémoire de fin d'étude, ENSA de Rennes (France), IRD (France) et IRESA (Tunisie), 114p.
- Palomo M.J., Moreno F., Fernandez J.E., Diaz- Espejo A., & Giron I.F. (2002), Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Management*, **55**, 15–35.
- Parent E. (1991), Elaboration des consignes de gestion des barrages-réservoirs. Thèse de doctorat, Université de Paris-Creteil, France, 216p.
- Parmee I.C., Cevtkovic D., Watson A.W., & Bonham C.R. (2000), Multiobjective satisfaction within an interactive evolutionary design environment. *Evolutionary Computation*, **8**, (2), 197–222.
- Paturel J.-E. (2014), Exercice de scénarisation hydrologique en Afrique de l'Ouest—Bassin du Bani. *Hydrological Sciences Journal*, **59**, (6), 1135–1153.
- Paturel J.E., Delattre M.O., & Lubes-Niel H. (1998), Analysis of rainfall long series in non-Saharan West and Central Africa within the context of climate variability. *Hydrological Sciences Journal*, **43**, 937–946.
- Paturel J.E., Ouedraogo M., Servat E., Mahe G., Dezetter A., & Boyer J.F. (2003), The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, **48**, 125–138.
- Paturel J.E., Servat E., & Vassiliadis A. (1995), Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data- case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, **168**, (1–4), 111– 126.
- Payan J.-L. (2007), Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de doctorat, AgroParisTech, France, 256p.
- Peel M.C. & Blöschl G. (2011), Hydrological modelling in a changing world. *Progress in Physical Geography*, **35**, (2), 249–261.

- Pelikan M., Goldberg D.E., & Tsutsui S. (2003), Getting the best of both worlds: Discrete and continuous genetic and evolutionary in concert. *Information Sciences*, **156**, 147–171.
- Penide G. (2010), Mise en place de simulateurs d'instruments de télédétection dans un modèle méso-échelle (BRAMS): Application à l'étude d'un système convectif observé pendant la campagne AMMA. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Perrin C. (2000), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, INPG (Grenoble)/Cemagref (Antony), France, 291p.
- Perrin C., Michel C., & Andre V. (2001), Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, **242**, 275–301.
- Perrin C., Michel C., & Andre V. (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, **279**, 275–289.
- Perrin C., Michel C., & Andréassian V. (2007), Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR HydroSystèmes et Bioprocédés, 16p.
- Peters D.L. & Prowse T.D. (2001), Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological processes*, **15**, 3184–3194.
- Pettitt A.N. (1979), A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, **28**, (2), 126–135.
- Peyrillé P. (2006), Etude idéalisée de la mousson de l'Afrique de l'Ouest à partir d'un modèle numérique bidimensionnel. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Piani C., Haerter J.O., & Coppola E. (2010), Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical Application Climatology*, 187–192.
- Pilpayeh A., Jahromi H.M., & Raoof M. (2010), Optimization of multipurpose serial reservoir systems operation in deluge, normal rainfall, and drought conditions (A case study of Aras River Basin, Iran). *Journal of Food, Agriculture and Environment*, **8**, (3-4), 1004–1009.
- Piper B.S., Plinston D.T., & Sutcliffe J. V (1986), The water balance of Lake Victoria. *Hydrological Sciences Journal*, **31**, (1), 25–37.
- Playán E. & Mateos L. (2006), Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, **80**, (1-3), 100–116.
- PNGT2 (2007), Plan Communal de Développement de Boura. Rapport définitif, 81p.
- PNUE (2010), Atlas de l'eau en Afrique. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya, 325p.
- Poff N.L., Olden J.D., Merritt D., & Pepin D. (2007), Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. In *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **104**, 5732–5737.
- Poussin J.-C., Renaudin L., Adogoba D., Sanon A., Fowé T., Dogbe W., Fusillier J.-L., Barbier B., & Cecchi P. (2015), Performance of small reservoir irrigated schemes in the Upper Volta basin: Case studies in Burkina Faso and Ghana. *Water resources and rural development*, (in press).
- Pouyaud B. (1987), L'évaporation des nappes d'eau libre l'exemple du Lac de Bam au Burkina-Faso partie: échelles décadaire et mensuelle. *Hydrologie continentale*, **2**, (1), 29–46.
- Pouyaud B. (1990), L'évaporation des nappes d'eau libre en climat soudano-sahélien. Rapport technique, ORSTOM, pp. 169–180.
- Pushpalatha R., Perrin C., Le Moine N., Mathevet T., & Andréassian V. (2011), A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, **411**, (1-2), 66–76.
- Quintana Seguí P., Ribes A., Martin E., Habets F., & Boé J. (2010), Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, **383**, 111–124.
- Ragab R., Moidinis D., Albergel J., Khouri J., Drubi A., & Nasri S. (2001), The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs 2: Rainfall-runoff

- model applications to three Mediterranean hill reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, **5**, (4), 554–562.
- Rakhmatullaev S. (2010), Improvement of operational methods for the assessment of the water reservoir useful storage capacity using geoinformation systems. Doctoral thesis, Université Bordeaux 1, France, 254p.
- Randrianasolo A. (2012), Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés. Thèse de doctorat ISIVE/AgroParisTech, France, 314p.
- Rani D. & Madalena M. (2010), Simulation – Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resources Management*, **24**, 1107–1138.
- Reddy J.M. & Kumar N.D. (2006), Optimal Reservoir Operation Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm. *Water Resources Management*, **20**, 861–878.
- Reddy M.J. (2006), Swarm intelligence and evolutionary computation for single and multiobjective optimization in water resource systems. Doctoral thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 335p.
- Regulwar D.G. & Kamodkar R.U. (2010), Derivation of multipurpose single reservoir release policies with fuzzy constraints. *Journal of Water Resource and Protection*, **2**, 1030–1041.
- Renaudin L. (2012), Usages agricoles de l'eau des petits réservoirs dans le bassin de la Volta: Cas des réservoirs de Boura (Burkina Faso) et de Binaba II (Ghana). Mémoire de fin d'études d'Ingénieur, Institut des Régions Chaudes, Montpellier, France, 121p.
- Reznicek K.K. & Simonovic S.P. (1990), An improved algorithm for hydropower optimization. *Water Resources Research*, **26**, (2), 189–1998.
- Riahi K., Gruebler A., & Nakicenovic N. (2007), Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, **74**, (7), 887–935.
- Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., & Fischer G. (2011), RCP 8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, **109**, 33–57.
- Riou C. (1975), La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoires ORSTOM No. 80 Paris, 236p.
- Riou C. (1981), L'évaluation des pertes des réservoirs d'eau naturelles par évaporation. *Revue Tunisienne de l'Équipement*, **38**, (10), 90–96.
- Rippl (1883), The capacity of storage reservoirs for water supply. In *Minutes of Proceedings*. Thomas Telford, pp. 270–278.
- Ritzel B.J., Eheart J.W., & Ranjithan S. (1994), Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. *Water Resources Research*, **30**, 1589–1603.
- Roche M.F. (1963), *Hydrologie de surface*. ORSTOM, Paris.
- Rodier J.A. & Auvray C. (1965), *Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale*. ORSTOM-CIEH, Paris.
- Rodríguez L., Cello P., & Vionnet C. (2006), Modeling stream–aquifer interactions in a shallow aquifer, Choele Choel Island, Patagonia, Argentina. *Hydrogeology Journal*, **14**, 591–602.
- Rogers P. & Hall A.W. (2003), *Effective Water Governance*. Global Water Partnership, Stockholm.
- Roncoli C., Kirshen P., Etkin D., Sanon M., Somé L., Dembélé Y., Sanfo B., Zoungrana J., & Hoogenboom G. (2009), From Management to Negotiation: Technical and Institutional Innovations for Integrated Water Resource Management in the Upper Comoé River Basin, Burkina Faso. *Environmental management*, **44**, 695–711.
- Rosenberry D.O., Winter T.C., & Likens G.E. (2007), Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, **340**, 149–166.
- Roudier P., Ducharne a., & Feyen L. (2014), Climate change impacts on runoff in West Africa: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**, (7), 2789–2801.
- Le Roy E. (2005), A study of the development of water resources in the Olifants catchment, South Africa: Application of the WEAP model. Master thesis, Imperial College London, 97p.

- Ruelland D., Ardoïn-bardin S., Collet L., & Roucou P. (2012), Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *Journal of Hydrology*, **424-425**, 207–216.
- Rukuni S. (2006), Modeling the response of small multi-purpose reservoirs to hydrology for improved rural livelihoods in the Mzingwane catchment: Limpopo Basin. Master thesis, University of Zimbabwe, 82p.
- Rummukainen M. (2010), State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **1**, (1), 82–96.
- Sacks B.L.A., Swancar A., & Lee T.M. (1998), Estimating Ground-Water Exchange with Lakes Using Water-Budget and Chemical Mass-Balance Approaches for Ten Lakes in Ridge Areas of Polk and Highlands Counties. Water-Resources investigations Report. U.S. Geological Survey, Tallahassee Florida, 57p.
- Salami Y.D. & Nnadi F.N. (2012), Reservoir storage variations from hydrological mass balance and satellite radar altimetry. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, **4**, (6), 201–207.
- Sally H. (1997), Améliorer les performances des périmètres irrigués. *Actes du Séminaire Régional du Projet management de l'irrigation au Burkina Faso*. IIMI: Colombo, Sri Lanka.
- Sally H., Lévite H., & Cour J. (2011), Local Water Management of Small Reservoirs: Lessons from Two Case Studies in Burkina Faso. *Water Alternatives*, **4**, (3), 365–382.
- Saltelli A. & Annoni P. (2010), How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling and Software*, **25**, (12), 1508–1517.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., & Ratto M. (2004), *Sensitivity analysis in practice. A guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- Sandoval-Solis S., McKinney D.C., & Loucks D.P. (2011), Sustainability Index for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water resources planning and management*, **137**, (5), 381–390.
- Sanou K., Nikiema A., Dipama J.M., & Cecchi P. (2011), Communalisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin du Nariarlé (Burkina Faso): Echelles imbriquées et prérogatives tronquées. *Actes des journées de Géographie Tropicale*, 24p.
- Sarr B., Atta S., & Kafando L. (2012), Revue des indices climatiques utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indiciaires en Afrique. *Sécheresse*, **23**, 255–260.
- Sauret E.S.G. (2013), Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso). Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 215p.
- Savy M., Martin-Prével Y., Traissac P., & Eymard-Duvernay, S. Delpeuch F. (2006), Dietary diversity scores and nutritional status of women change during the seasonal food shortage in rural Burkina Faso. *Journal of Nutrition*, **136**, (10), 2625–2632.
- Schaffer J., Caruana R., Eshelman L., & Das R. (1989), A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, George Mason University, pp. 51–60.
- Schmengler A.C. (2011), *Modeling soil erosion and reservoir sedimentation at hillslope and catchment scale in semi-arid Burkina Faso*. Ecology and Development Series N° 80,
- Schmidli J., Goodess C.M., Frei C., Haylock M.R., Hündecha Y., Ribalaygua J., & Schmith T. (2007), Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal Geophysical Research*, **112**, 1–20.
- Schwefel H.P. (1981), *Numerical Optimization of Computer Models*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Séguis L., Kamagaté B., Favreau G., Descloitres M., Seidel J.-L., Galle S., Peugeot C., Gosset M., Le Barbé L., Malinur F., Van Exter S., Arjounin M., Boubkraoui S., & Wubda M. (2011), Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin

- (Benin, West Africa) Inter-annual variability of water budget. *Journal of Hydrology*, **402**, (1-2), 1–13.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M., & Masson J.M. (1997), Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, **191**, 1–15.
- Shabani N. (2009), Incorporating Flood Control Rule Curves of the Columbia River Hydroelectric System in A Multireservoir Reinforcement Learning Optimization Model. Master's thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Shin M., Guillaume J.H.A., Croke B.F.W., & Jakeman A.J. (2013), Addressing ten questions about conceptual rainfall – runoff models with global sensitivity analyses in R. *Journal of Hydrology*, **503**, 135–152.
- Shrestha B.P., Duckstein L., & Stakhiv E.Z. (1996), Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation. *Journal of Water Resource Planning and Management*, **122**, 263–269.
- Sieber A. & Uhlenbrook S. (2005), Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure. *Journal of Hydrology*, **310**, 216–235.
- Sieber J. & Purkey D. (2005), WEAP—Water Evaluation and Planning System. User Guide for WEAP21. SEI, Somerville, 219p.
- Silva R. (2003), Evaluation des ressources en eau dans les pays membres du CILSS. *Running Water, Trimestriel Ouest Africain de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau, Octobre 2002/Mars 2003, N° 6-7*, 20–29.
- Simonović S.P. (2009), *Managing water resources. Methods and tools for a systems approach*. Routledge, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.
- Simonovic S.P. & Burn D.H. (1989), An improved methodology for short-term operation of a single multipurpose reservoir. *Water Resources Research*, **25**, (1), 1–8.
- Singh A. (2012), An overview of the optimization modelling applications. *Journal of Hydrology*, **466-467**, 167–182.
- Smith M. (1992), *CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management*. FAO, Rome, Italy.
- Steduto P., Hsiao C.T., Fereres E., & Raes D. (2012), *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, Italy.
- Steinemann S. & Cavalcanti L. (2006), Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water resources planning and management*, **132**, (3), 164–173.
- Stephenson D. & Petersen M.S. (1991), *Water resources development in developing countries. Developments in water science, 41*. Elsevier B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- Suiadee W. & Tingsanchali T. (2007), A combined simulation – genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: a case study of the Nam Oon Irrigation Project , Thailand. *Hydrological processes*, **21**, 3211–3225.
- Sukhija B.S., Reddy D.V., Nandakumar M.V., & Rama (1997), A method for evaluation of artificial recharge through percolation tanks using environmental chloride. *Ground Water*, **35**, (1), 161–165.
- Sultan B., Roudier P., Quirion P., Alhassane A., Muller B., Dingkuhn M., Ciais P., Guimberteau M., Traore S., & Baron C. (2013), Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, **8**, (1), 014040.
- Sunyer M.A., Madsen H., & Ang P.H. (2012), A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*, **103**, 119–128.
- Talbi E. (1999), Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire multi-objectifs: Etat de l'art. *Rapport CNET (France Telecom) Octobre*, 34p.
- Tanny J., Cohen S., Assouline S., Lange F., Grava A., Berger D., Teltch B., & Parlange M.B. (2008), Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. *Journal of Hydrology*, **351**, 218–229.

- Tim D. (2008), *Fundamentals of Hydrology*. Routledge Taylor & Francis Group, London and New York.
- Tramblay Y., Ruelland D., Somot S., Bouaicha R., & Servat E. (2013), High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 3721–3739.
- Tran L.D., Schilizzi S., Chalak M., & Kingwell R. (2011), Optimizing competitive uses of water for irrigation and fisheries. *Agricultural Water Management*, **101**, (1), 42–51.
- Turner G., Ingham M., Bibby H., & Keys H. (2011), Resistivity monitoring of the tephra barrier at Crater Lake, Mount Ruapehu, New Zealand. *Journal of Applied Geophysics*, **73**, 243–250.
- Ufoegbune G.C., Yusuf H.O., Eruola A.O., & Awomeso J.A. (2011), Estimation of Water Balance of Oyan Lake in the North West Region of Abeokuta, Nigeria. *British Journal of Environment and Climate Change*, **1**, (1), 13–27.
- UICN (2004), *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*. Union mondiale pour la nature (UICN), Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni.
- UNESCO-WMO (2012), *International glossary of hydrology*. Genève 2.
- USBR and USDA (2001), *Water measurement manual, A water research technical publication*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Vallet-coulomb C., Legesse D., Gasse F., Travi Y., & Chernet T. (2001), Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). *Journal of Hydrology*, **245**, 1–18.
- Venot J. & Cecchi P. (2011), Valeurs d'usage ou performances techniques: comment apprécier le rôle des petits barrages en Afrique subsaharienne? *Cahier Agriculture*, **20**, (1-2), 112–117.
- Venot J., de Fraiture C., & Nti Acheampong E. (2012), Revisiting Dominant Notions: A review of costs, performance and institutions of small reservoirs in sub-Saharan Africa. IWMI Research Report 145: Colombo, Sri Lanka, 39p.
- Venot J. & Krishnan J. (2011), Discursive Framing: Debates over Small Reservoirs in the Rural. *Water Alternatives*, **4**, (3), 316–324.
- Vogel R.M. & Bolognese R.A. (1995), Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems. *Water Resources Research*, **31**, (3), 645–654.
- Votruba L. & Broza V. (1989), *Water management in reservoirs*. Developments in water science No. 33.
- Van Vuuren D.P., Eickhout B., Lucas P.L., & den Elzen M.G.J. (2007), Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: An assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, **81**, 119–159.
- Walker S. (1998), Sustainable water resources management beyond the 1995– 96 drought. In *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-water Maritime Engineering*, **130**, 207–216.
- Wang K., Chang L., & Chang F. (2011), Multi-tier interactive genetic algorithms for the optimization of long-term reservoir operation. *Advances in Water Resources*, **34**, (10), 1343–1351.
- Wang Y.C., Yoshitani J., & Fukami K. (2005), Stochastic multiobjective optimization of reservoirs in parallel. *Hydrological Processes*, **19**, 3551–3567.
- WCD (2000), Eau, développement et grands barrages. *Barrages et développement: un nouveau cadre pour la prise de décisions*, 36p.
- Wilcoxon F. (1945), Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, **1**, (6), 80–83.
- Winter T.C. (1981), Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resources Bulletin*, **17**, (1), 82–115.
- Winter T.C., Rosenberry D.O., & Sturrock A.M. (1995), Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north Central United States. *Water Resources Research*, **31**, 983–993.

- Wood A.W., Leung L.R., Sridhar V., & Lettenmaier D.P. (2004), Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, **62**, 189–216.
- Wurbs R. A. (2012), Reservoir/River system management models. *Texas Water Journal*, **3**, (1), 26–41.
- Wurbs R.A. (1991), Optimization of multiple-purpose reservoir system operations: A review of modeling and analysis approaches. Research document 34, Corps of Engineers, US Army, Davis, California, USA, 92p.
- Xu C., Tunemar L., Chen Y.D., & Singh V.P. (2006), Evaluation of seasonal and spatial variations of lumped water balance model sensitivity to precipitation data errors. *Journal of Hydrology*, **324**, 80–93.
- Yates D., Sieber J., Purkey D., & Huber-lee A. (2005), WEAP21 – A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 1, model characteristics. *Water International*, **30**, (4), 487–500.
- Yeh W.W.-G. (1985), Reservoir Management and Operations Models. *Water Resources Research*, **21**, (12), 1797–1818.
- Zahraie B. & Hosseini S.M. (2009), Development of reservoir operation policies considering variable agricultural water demands. *Expert Systems With Applications*, **36**, 4980–4987.
- Zakari M.M., Chuan M.M., & Issoufou A. (2011), Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): A Model to Assess Future Water Demands in the Niger River (In Niger Republic). *Modern Applied Science*, **5**, (1), 38–49.
- Zannou Y.A.B. (2011), Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin Cas du Bassin de l’Ouémé à Bétérou Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA - Chaire UNESCO). Thèse de doctoral, Université d’Abomey-Calavi, Cotonou, République du Benin, 356p.
- Zavoianu I. (1985), *Morphometry and drainage basins*. Academiei, Bucharest.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

Figure 2 - 1 : Illustration des barrages-réservoirs.....	13
Figure 2 - 2 : Carte des retenues d'eau du Burkina Faso en 2011.....	15
Figure 2 - 3 : Evolution du nombre de réservoirs au Burkina Faso. Seuls sont pris en compte les ouvrages recensés dans la base de la DGRE dont l'année de construction est connue (N = 1297).....	17
Figure 2 - 4 : Répartition des réservoirs par type au Burkina Faso.....	18
Figure 2 - 5 : Usages de l'eau des réservoirs.....	22
Figure 2 - 6 : Modifications du cycle hydrologique pouvant être engendrées par un barrage.....	24
Figure 2 - 7 : Gestion des barrages par la méthode du « fil tendu ».....	26
Figure 2 - 8 : Zones de fonctionnement d'un réservoir.....	27
Figure 2 - 9 : Variation des zones de fonctionnement au cours de l'année au en zone soudano-sahélienne.....	28

Chapitre 3

Figure 3 - 1 : Localisation géographique du bassin versant de Boura.....	39
Figure 3 - 2 : Schéma du mécanisme climatique de l'Afrique de l'Ouest avec deux autres grands courants d'air : African East Jet (AEJ) et Tropical East Jet (TEJ).	40
Figure 3 - 3 : Evolution de la pluie annuelle et des indices pluviométriques à Boura sur la période 1961-2010.....	41
Figure 3 - 4 : Répartition mensuelle moyenne des précipitations à Boura (1961-2010).....	42
Figure 3 - 5 : Evolution des moyennes mensuelles interannuelles de certains paramètres climatiques à Pô : (a) température, (b) humidité, (c) insolation, (d) vitesse du vent et (e) ETP.....	44
Figure 3 - 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la retenue de Boura.....	46
Figure 3 - 7 : Topographie et réseau hydrographique du bassin versant de la retenue de Boura.....	48
Figure 3 - 8 : Intermittence des écoulements sur le cours d'eau Poudiénié à Boura.....	49
Figure 3 - 9 : Carte pédologique du bassin versant drainant la retenue de Boura.....	50
Figure 3 - 10 : Unités d'occupation du sol du bassin versant de la retenue de Boura.....	52
Figure 3 - 11 : Plan de la cuvette de la retenue de Boura au niveau du Plan d'Eau Normal (PEN).....	54
Figure 3 - 12 : Dispositif d'exhaure au niveau du périmètre PIAME à Boura.....	56
Figure 3 - 13 : Périmètres irrigués autour de la retenue d'eau de Boura et leur découpage en zones...57	
Figure 3 - 14 : Calendrier cultural au niveau des périmètres irrigués Corikab et PIAME à Boura.....	57

Chapitre 4

Figure 4 - 1 : Dispositif de mesure des paramètres hydrométéorologiques à Boura.....	66
Figure 4 - 2 : Courbes hauteur/ volume et hauteur/surface du réservoir de Boura.....	71
Figure 4 - 3 : Emplacement des profils géophysiques réalisés autour de la retenue de Boura.....	73
Figure 4 - 4 : (a) Techniques de jaugeages mises en œuvre à Boura, (b) Dispositif de suivi des niveaux d'eau dans les canaux primaires, (c) Entretien avec les maraîchers sur les parcelles....	77
Figure 4 - 5 : Effectif de l'échantillon enquêté par tranche d'âge.....	78
Figure 4 - 6 : Variation de l'état de remplissage du barrage de Boura sur la période du 1 ^{er} avril 2012 au 15 novembre 2014 (Cote du déversoir = 100 m et Cote de la prise d'eau = 97 m).	83
Figure 4 - 7 : Evolution des niveaux du plan d'eau du barrage de Boura à différentes échelles temporelles (a) horaire, (b) journalière, (c) hebdomadaire et (d) mensuelle sur la période du 1 ^{er} avril 2012 au 15 novembre 2014.....	84
Figure 4 - 8 : Distribution mensuelle des pluies (RF) et de l'évaporation bac (EVP) sur les périodes Avr-12/Mar-13, Avr-13/Mar-14 et Avr-14/Oct-14.....	85
Figure 4 - 9 : Evolution des évaporations moyennes journalières mensuelles diurne (06 h – 18 h) et nocturne (18 h – 06 h) au niveau du bac évaporatoire à Boura sur la période avril 2012 à octobre 2014.....	87

Figure 4 - 10 : Evolution des cumuls journaliers des volumes déversés à Boura sur la période Avril 2014 à Octobre 2014.....	89
Figure 4 - 11 : Positions de quelques ouvrages hydrauliques (forages et puits du côté burkinabè) par rapport aux linéaments identifiés sur le bassin versant du barrage de Boura. Il n'y a pas eu de prospection terrain (forage et puits) sur la partie ghanéenne du bassin.	90
Figure 4 - 12 : Evolution des débits moyens mensuels du bassin versant du barrage de Boura pour les années 2012, 2013 et 2014 sur la période d'avril à octobre.....	94
Figure 4 - 13 : Bilan hydrologique mensuel du barrage de Boura sur les périodes (a) avril-12/mars-13 (2012/2013) et (b) avril-13/mars-14 (2013/2014) : les flux entrants (partie positive) et les flux sortants (partie négative).....	97

Chapitre 5

Figure 5 - 1 : Schéma de principe des interactions entre les différents sous modèles utilisés dans cette thèse.	100
Figure 5 - 2 : Architecture du modèle GR4J	102
Figure 5 - 3 : (a) Hydrogrammes des apports observés (bilan hydrique) et simulés (GR4J) pour le bassin versant du barrage de Boura et (b) Comparaison des débits observés et calculés entre Avril 2012-Mars 2014.	106
Figure 5 - 4 : Effet des erreurs systématiques de précipitation sur les lames d'eau écoulées moyennes annuelles avec le modèle GR4J pour le bassin versant du barrage de Boura.	107
Figure 5 - 5 : Courbe représentative de l'évolution du coefficient cultural pour une culture particulière (d'après Allen et al., 1998).	109
Figure 5 - 6 : Courbe théorique de la surface du réservoir en fonction du volume stocké.....	111
Figure 5 - 7 : Comparaison des volumes évaporés mesurés et reconstitués au niveau du réservoir de Boura.	112
Figure 5 - 8 : Comparaison entre les volumes infiltrés estimés à partir du bilan hydrologique et ceux reconstitués à partir du modèle de puissance.	113
Figure 5 - 9 : Schéma conceptuel de l'hydrosystème de Boura modélisé dans WEAP.	115
Figure 5 - 10 : Evolution des demandes en eau mensuelles pour différentes sollicitations au niveau de la retenue de Boura sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.	116
Figure 5 - 11 : Courbes observée et simulée (WEAP) de remplissage du réservoir de Boura au pas de temps journalier sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.	117
Figure 5 - 12 : Courbes observée et simulée (WEAP) de remplissage du réservoir de Boura au pas de temps mensuel sur la période Novembre 2012 à Octobre 2013.	117

Chapitre 6

Figure 6 - 1 : Schéma conceptuel du système modélisé.....	127
Figure 6 - 2 : Organigramme d'évaluation d'une solution donnée au problème formulé.	131
Figure 6 - 3 : Evolution de la fonction d'adaptation et des fonctions objectifs en fonction du nombre de générations.	134
Figure 6 - 4 : Evolution mensuelle des fournitures d'eau optimales et des demandes en eau.....	135
Figure 6 - 5 : Comparaison des courbes des volumes stockés observés et ceux issus de l'optimisation du système.	136
Figure 6 - 6 : Evolution des stocks d'eau pour différentes valeurs du volume initial du réservoir : cas sans aquifère.	137
Figure 6 - 7 : Evolution mensuelle des demandes en eau et des fournitures en eau optimales calculées par l'outil OPTIWAM sans l'aquifère pour des scénarios correspondants à différents niveaux du stockage initial du réservoir.	139
Figure 6 - 8 : Schéma conceptuel du système modélisé avec l'aquifère comme source d'approvisionnement.	142
Figure 6 - 9 : Comparaison des courbes des volumes stockés observés et ceux issus de l'optimisation du système avec ou sans aquifère.	143
Figure 6 - 10 : Evolution des stocks d'eau pour différentes valeurs du volume initial du réservoir : cas avec l'aquifère.	144

Figure 6 - 11 : Evolution mensuelle des demandes en eau et des fournitures en eau optimales calculées par l’outil OPTIWAM avec l’aquifère pour des scénarios correspondants à différents niveaux du stockage initial du réservoir.....145

Chapitre 7

Figure 7 - 1 : Chaîne de modélisation générale d’une étude des impacts du changement climatique.152

Figure 7 - 2 : Evolution des écarts-types glissants sur une fenêtre de 30 ans pour la série des pluies annuelles simulées par le modèle RCA4 sous le scénario RCP4.5 sur la période 2006 à 2100.153

Figure 7 - 3 : Méthodologie détaillée de l’étude d’impact potentiel du changement climatique sur le réservoir de Boura.....154

Figure 7 - 4 : Comparaison entre les caractéristiques des variables climatiques simulées et celles issues des observations à Boura sur la période 1971-2000 : (a) nombre de jours de pluie par an, (b) hauteur de pluie annuelle, (c) nombre moyen de jours pluvieux par mois, (d) hauteur moyenne de pluie par mois, (e) intensité moyenne de la pluie et (f) ETP annuelle.....156

Figure 7 - 5 : Fréquences de distribution associées aux pluies journalières brutes (bru) et corrigées (cor) sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour deux scénarios RCPs.161

Figure 7 - 6 : Comparaison des caractéristiques des données pluviométriques observées et simulées corrigées sur la période de référence (1971-2000).161

Figure 7 - 7 : Comparaison des données simulées entre les différents RCP aux horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) et la période de référence (1971-2000) d’une part, et entre les pluies moyennes mensuelles historiques simulées et observées, d’autre part.164

Figure 7 - 8 : Evolution des cumuls annuels des pluies à Boura sur la période de référence (1971-2000) et les horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....165

Figure 7 - 9 : Facteurs correctifs d’ETP journalières brutes et évolution du cycle annuel d’ETP moyennes mensuelles sur les horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et sur la période de référence.166

Figure 7 - 10 : Evolution des ETPs moyennes annuelles à Boura entre la période de référence (1971-2000) et les horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....167

Figure 7 - 11 : Cycles saisonniers des précipitations (a) et de l’ETP (b) observées et simulées sur le bassin amont de Boura sur la période de référence (1971- 2000) et aux horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios d’émission RCP4.5 et RCP8.5. Les cycles ont été lissés sur 30 jours.168

Figure 7 - 12 : Hydrogrammes des débits moyens mensuels simulés aux horizons d’intérêt (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 comparés à celui de la période de référence (1971-2000).171

Figure 7 - 13 : Evolution des volumes moyens mensuels des demandes en d’irrigation pour les trois horizons 2020, 2050 et 2080 avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 comparés aux volumes reconstitués sur la période de référence 1971-2000.173

Figure 7 - 14 : Evolution des stocks simulés à la fin de chaque mois en fonction de la fréquence d’apparition sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.....178

Figure 7 - 15 : Courbes de remplissage du réservoir sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.....180

Figure 7 - 16 : Demande en eau (WDS) et fournitures d’eau (RR) pour les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone (WDS: Water Demand Supply ; RR: Release of Reservoir).....183

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2 – 1 : Situation de quelques grands barrages au Burkina Faso.	18
Tableau 2 – 2 : Synthèse de quelques études appliquant les AGs aux problèmes de gestion des ressources en eau.	31
Tableau 2 - 3 : Modèles de simulation de la gestion d'un système barrage-réservoir.	32

Chapitre 3

Tableau 3 - 1 : Variations relatives des pluies moyennes annuelles par décennie par rapport à la moyenne des pluies annuelles de la période 1961-2010.	41
Tableau 3 - 2 : Classes de relief des bassins versants.	46
Tableau 3 - 3 : Caractéristiques géométriques et morphométriques du bassin versant du barrage de Boura.	47
Tableau 3 - 4 : Répartition des infrastructures hydrauliques dans la commune de Boura.	52
Tableau 3 - 5 : Paramètres techniques du barrage de Boura.	53
Tableau 3 - 6 : Caractéristiques techniques du périmètre aval de Boura.	55
Tableau 3 - 7 : Période et taux de croissance de la population à Boura.	59
Tableau 3 - 8 : Effectif du cheptel par espèces au niveau de la commune de Boura.	60

Chapitre 4

Tableau 4 - 1 : Caractéristiques annuelles de la pluie et de l'évaporation au niveau du réservoir de Boura.	85
Tableau 4 - 2 : Distribution des pluies journalières pour les saisons 2012, 2013 et 2014 à Boura.	86
Tableau 4 - 3 : Evaporation bac (Ebac) et évapotranspiration de référence (ET _o) mensuelles à Boura sur la période Septembre 2013 à Août 2014.	88
Tableau 4 - 4 : Types de bétail et Unités de Bétail Tropical associées (UBT)	93
Tableau 4 - 5 : Paramètres hydroclimatiques au niveau du réservoir de Boura sur une période commune aux saisons 2012, 2013 et 2014.	95
Tableau 4 - 6 : Récapitulatif des composantes du bilan hydrologique du réservoir de Boura sur les périodes avril-12/mars-13 et avril-13/mars-14.	96

Chapitre 5

Tableau 5 - 1 : Variables des critères d'ajustement.	104
Tableau 5 - 2 : Synthèse des valeurs des paramètres du modèle GR4J pour différents intervalles de confiance (Shin et al., 2013).	105
Tableau 5 - 3 : Besoins nets d'irrigation pendant la contre-saison pour différentes spéculations culturales à Boura pour toute la période de culture.	110
Tableau 5 - 4 : Récapitulatif des données nécessaires pour la simulation du réservoir de Boura avec WEAP.	115
Tableau 5 - 5 : Critères de performance de l'outil WEAP pour la simulation des volumes du réservoir de Boura.	119

Chapitre 6

Tableau 6 - 1 : Architecture du nombre de variables de décision pour un pas de temps Δt	127
Tableau 6 - 2 : Synthèse des paramètres et opérateurs de l'AG.	134
Tableau 6 - 3 : Ecarts relatifs mensuels entre les volumes des demandes en eau et des fournitures optimales.	135
Tableau 6 - 4 : Performances des solutions optimales pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche).	137

- Tableau 6 - 5 :** Critères RRV relatifs à la satisfaction des demandes d'irrigation pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche) : cas sans aquifère.138
- Tableau 6 - 6 :** Critères RRV relatifs à la satisfaction des demandes d'irrigation pour différents scénarios considérés (Humide, Normale, Sèche et Très Sèche) : cas avec aquifère....144

Chapitre 7

- Tableau 7 - 1 :** Paramètres statistiques des cumuls annuels des précipitations observées et simulées pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080).162
- Tableau 7 - 2 :** Taux de variations moyens mensuels (%) des précipitations pour les horizons 2020, 2050 et 2080 pour chaque scénario RCP par rapport à la moyenne de la période de référence 1971-2000.163
- Tableau 7 - 3 :** Paramètres statistiques des cumuls annuels d'ETP observées et simulées pour les horizons d'intérêt (2020, 2050 et 2080).165
- Tableau 7 - 4 :** Indicateurs statistiques des écoulements moyens annuels.170
- Tableau 7 - 5 :** Récapitulatif de l'impact du changement climatique sur les variables hydrologiques du bassin amont du barrage de Boura.172
- Tableau 7 - 6 :** Besoins nets moyens annuels d'irrigation et variations absolues des volumes de demande en eau au niveau des aménagements agricoles autour du réservoir de Boura aux horizons futurs (2020, 2050 et 2080) par rapport à ceux de la période de référence (1971-2000).174
- Tableau 7 - 7 :** Fréquences (%) de violations des stocks minimum et maximum du réservoir sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.177
- Tableau 7 - 8 :** Résultat du test statistique appliqué aux couples de séries de données des volumes moyens mensuels sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.181
- Tableau 7 - 9 :** Taux moyen de couverture de la demande en eau sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarios de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.182
- Tableau 7 - 10 :** Mesures de performance du modèle de simulation relatifs à la satisfaction de la demande en eau sur la période de référence (1971-2000) et les horizons futurs (2020, 2050 et 2080) pour les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et les scénarii de demande basés sur les perspectives de développement futur de la zone.186

ANNEXES

Annexe 3.A. : Démarche méthodologique du traitement des images satellitaires.....	224
Annexe 4.A. : Questionnaire individuel auprès des maraichers en amont du barrage de Boura.....	225
Annexe 4.B. : Mise en évidence des linéaments à partir des traitements de l'image Landsat.....	228
Annexe 4.C. : Profils électriques 2D des différents panneaux réalisés autour du barrage de Boura...	230
Annexe 5.A. : Description mathématique du modèle pluie-débit journalier GR4J.....	232
Annexe 5.B. : Analyse statistique : test de Mann-Whitney (1947).....	236
Annexe 6.A. : Généralités sur la gestion optimale de réservoirs.....	239
Annexe 6.B. : Approche de résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs.....	245
Annexe 6.C. : Algorithmes de résolution : Algorithmes Evolutionnaires.....	248
Annexe 6.D. : Critères quantitatifs d'évaluation de la performance du système : critères RRV.....	255
Annexe 6.E. : Reformulation des fonctions objectifs f_{DNS} et f_{WP} dans le cas de la gestion avec l'aquifère comme source d'approvisionnement.....	257
Annexe 6.F. : Evolution des fonctions critères avec l'aquifère comme une source d'approvisionnement.....	259
Annexe 6.G. : Fournitures optimales à partir des sources à la satisfaction des demandes en eau.....	260

Les numéros des annexes sont rattachés au chapitre y afférent. Ces numéros sont suivis des lettres majuscules qui indiquent la progression des annexes du chapitre.

Annexe 3.A.

Démarche méthodologique du traitement des images satellitaires

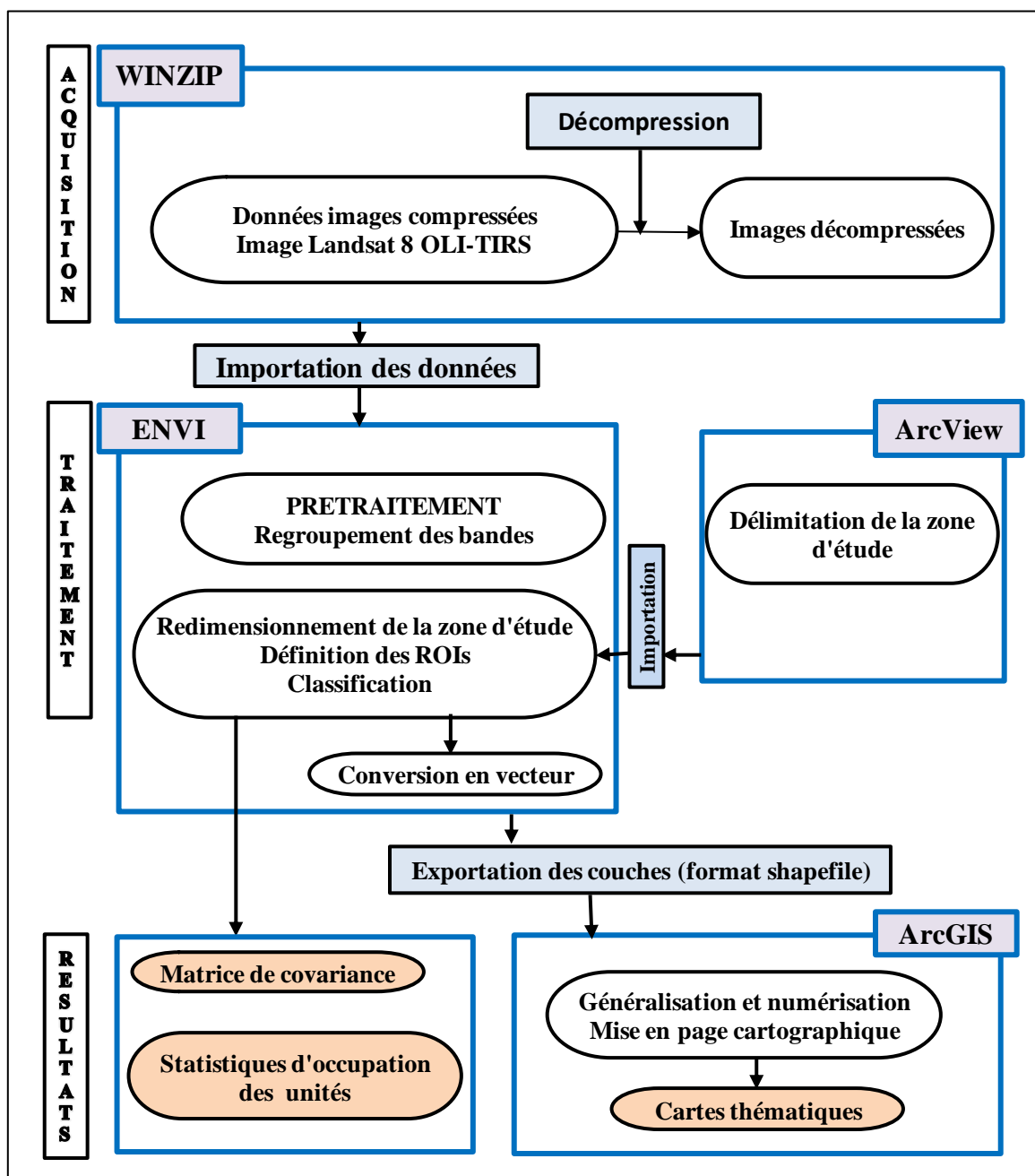


Figure 3.A.1 : Procédure de traitement des images satellitaires.

Annexe 4.A.**Questionnaire individuel auprès des usagers en amont du barrage de Boura****Identité de l'enquêté****Date**

Nom de l'enquêté :

Sexe : M F

Âge :

Type d'activités : Maraîchage Fabrication des briques ElevageOrigine : Autochtone AllochtoneSituation matrimoniale : Célibataire Marié(e) Veuf (ve)Localisation : Latitude Longitude **Maraîchage***M1 : Appartenez-vous au groupement Toumhositi ?* Oui Non*M2 : De combien de parcelles disposez-vous et quelle est la taille de chacune ?*

- Nombre de parcelles :
- Taille ou superficie des parcelles : en hectare

Les questions suivantes concernent chaque parcelle*M3 : Quelles sont les spéculations que vous pratiquez ?* Tomate Oignon Chou Courgette Autres (à préciser)*M4 : Quel est le calendrier des semis*

- Période d'implantation (semis) :
- Combien de récolte faites-vous par campagne ?
- A quelle période faites-vous vos récoltes ? :

M5 : Sur ce calendrier, indiquez la date de démarrage et d'arrêt de l'irrigation

- Quelle est la période de démarrage de l'irrigation ?
- Quelle est la période d'arrêt de l'irrigation ?

Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec

M6 : Pour chaque parcelle, quel est le mode d'irrigation ?

- Manuel Arrosoirs Bidons
- Motopompe
- Autres :

M7 : Dose et fréquence d'irrigation

- Si Arrosoirs/bidons :

Quel est la capacité du récipient utilisé ? en litres

Nombre d'arrosoirs/bidons pour chaque séance d'irrigation :

- Si motopompe :

Quelle est la durée de pompage ?

Quel est le débit de pompage ?

- Combien de fois irriguez-vous par jour ?
- Quelle est la durée de chaque irrigation ? en heures
- Combien de jours d'irrigation par semaine ? en jours
- Est-ce que la taille de votre parcelle varie en fonction l'accessibilité à l'eau ?

Oui Non

M8 : Qui irrigue ?

Propriétaire Ouvrier Autres (à préciser)

Nombre de personnes?

M9 : Aviez-vous mené cette activité la campagne précédente ? Oui Non

Si oui, est-ce que la taille de la parcelle a changé Augmenté Diminué Constant

Sinon, pourquoi avez-vous opté pour cette activité cette année ?

M10 : A qui appartient la parcelle ?

M11 : Quelles difficultés ou problèmes rencontrez-vous pour irriguer vos cultures ?

Fabrication des briques

F1 : Appartenez-vous à un groupement de fabricants des briques ?

Oui Non

F2 : Dans quelle période menez-vous cette activité ?

- Mois de début :
- Mois de fin :

F3 : Quels récipients utilisez-vous pour prélever l'eau ? Barrique Bidon

F4 : Quelles sont leur capacité ? 20 L 100 L 200 L

F5 : Pour une journée d'activité, quelle quantité d'eau utilisez-vous ? Barrique Bidon

F6 : Combien de briques fabriquez-vous par jour, par semaine ou durant toute cette période?

Jour Semaine Toute la période

F7 : Combien de personnes sont impliquées dans cette activité ?

F8 : Quels sont les problèmes en termes d'utilisation de l'eau de la retenue auxquels vous êtes souvent confrontés ?

Abreuvement des animaux

A1 : Appartenez-vous à un groupement d'éleveurs ?

A2 : De quel type de bétail êtes-vous en charge ? Bovins Ovins Asin Caprin

A3 : Combien de têtes d'animaux dispose votre troupeau ?

A4 : Comment abreuvez-vous vos animaux ?

- Abreuvement direct dans la retenue Oui Non

A5 : Combien de fois par jour amenez-vous votre troupeau s'abreuver ?

A6 : Quelles sont les périodes pendant lesquelles vous abreuvez vos animaux au niveau du barrage?

Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec

Annexe 4.B.

Mise en évidence des linéaments à partir des traitements de l'image landsat

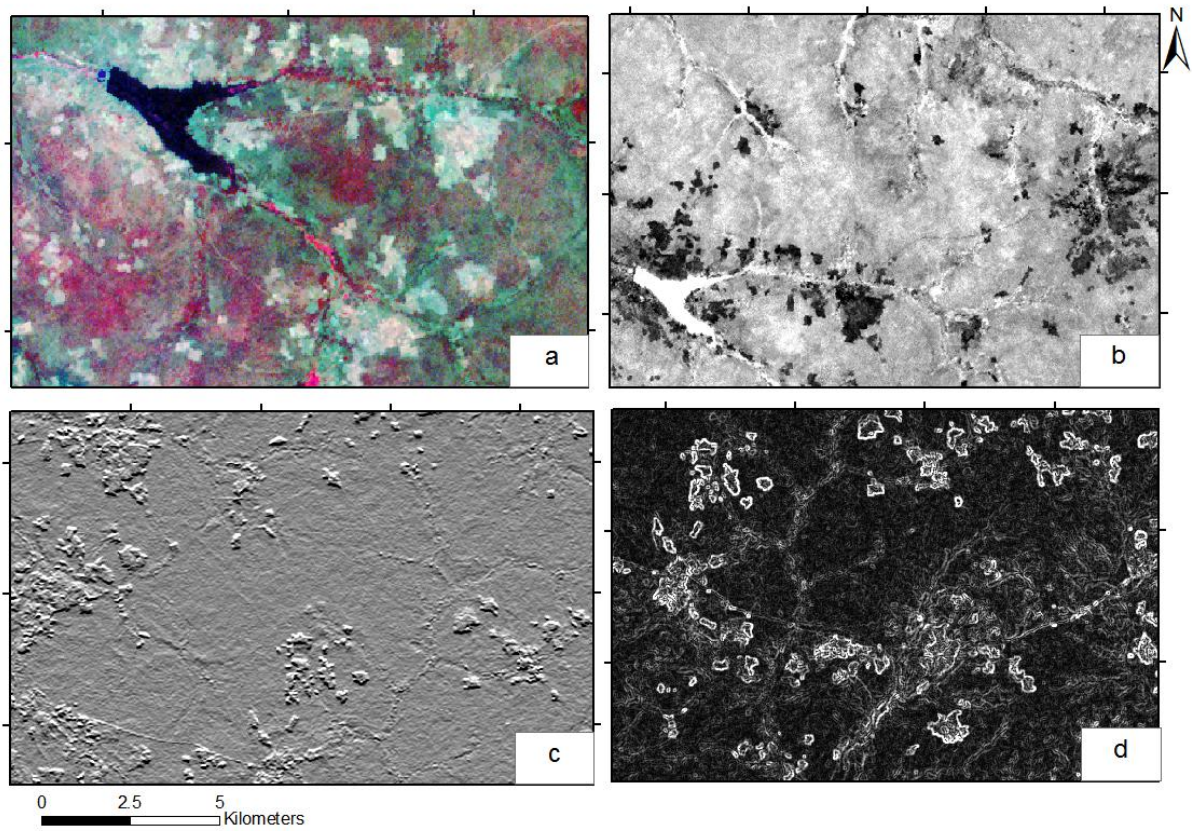


Figure 4.B.1 : Différents traitements de l'image landsat : (a) composition colorée, (b) combinaison de bandes, (c) filtre sobel et (d) filtre directionnel (Kone, 2014).

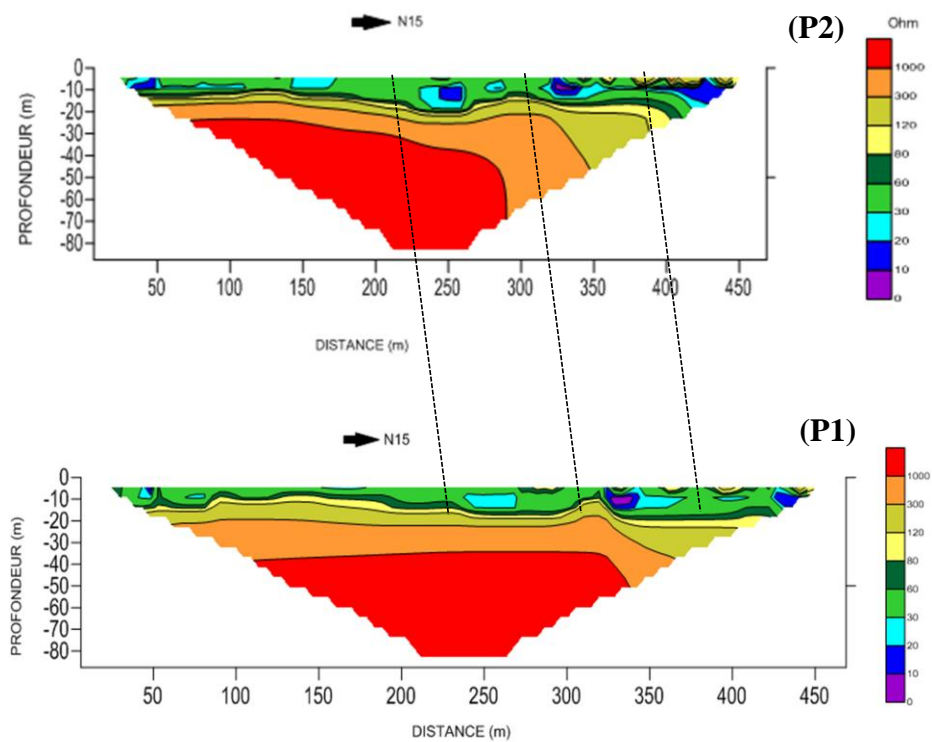
Annexe 4.C.**Profils électriques 2D des différents panneaux réalisés autour du barrage de Boura**

Figure 4.C.1 : Profils électriques des panneaux réalisés en Aval de la digue.

P1 : profil de 475 m de long situé à 20 m de la digue de Boura

P2 : profil de 475 m de long situé au pied du talus aval du barrage de Boura

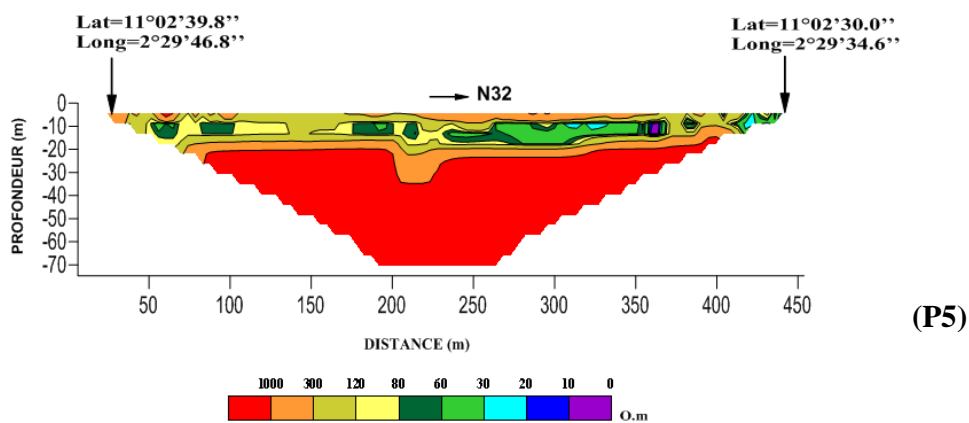
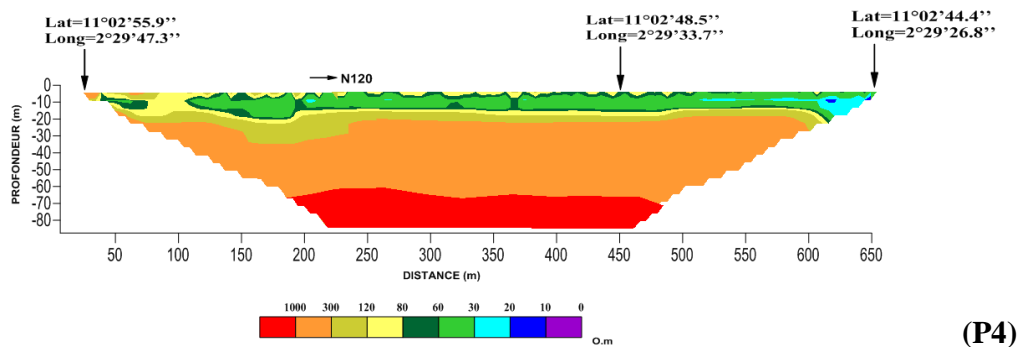
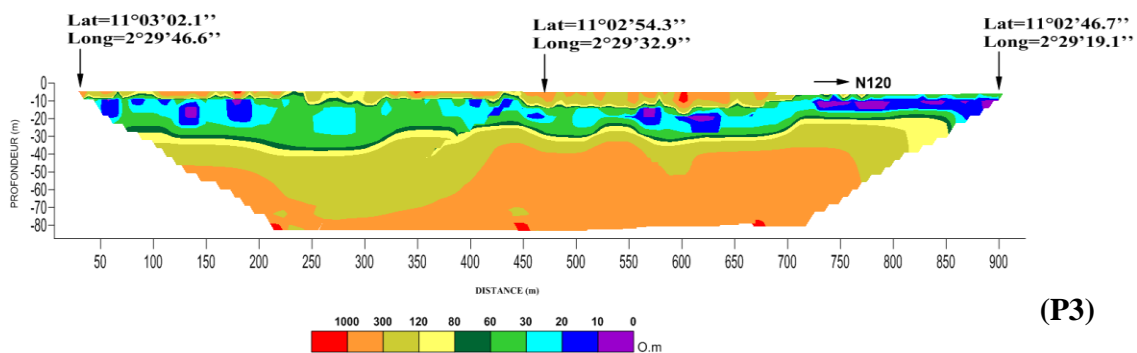


Figure 4.C.2 : Profils électriques des panneaux réalisés sur la Rive droite.

P3 : Profil de 950 m de long passant à environ 230 m du plan d'eau rive droite

P4 : Profil de 715 m de long passant à environ 80 m du plan d'eau rive droite

P5 : Profil de 475 m de long recoupant P3 et P4

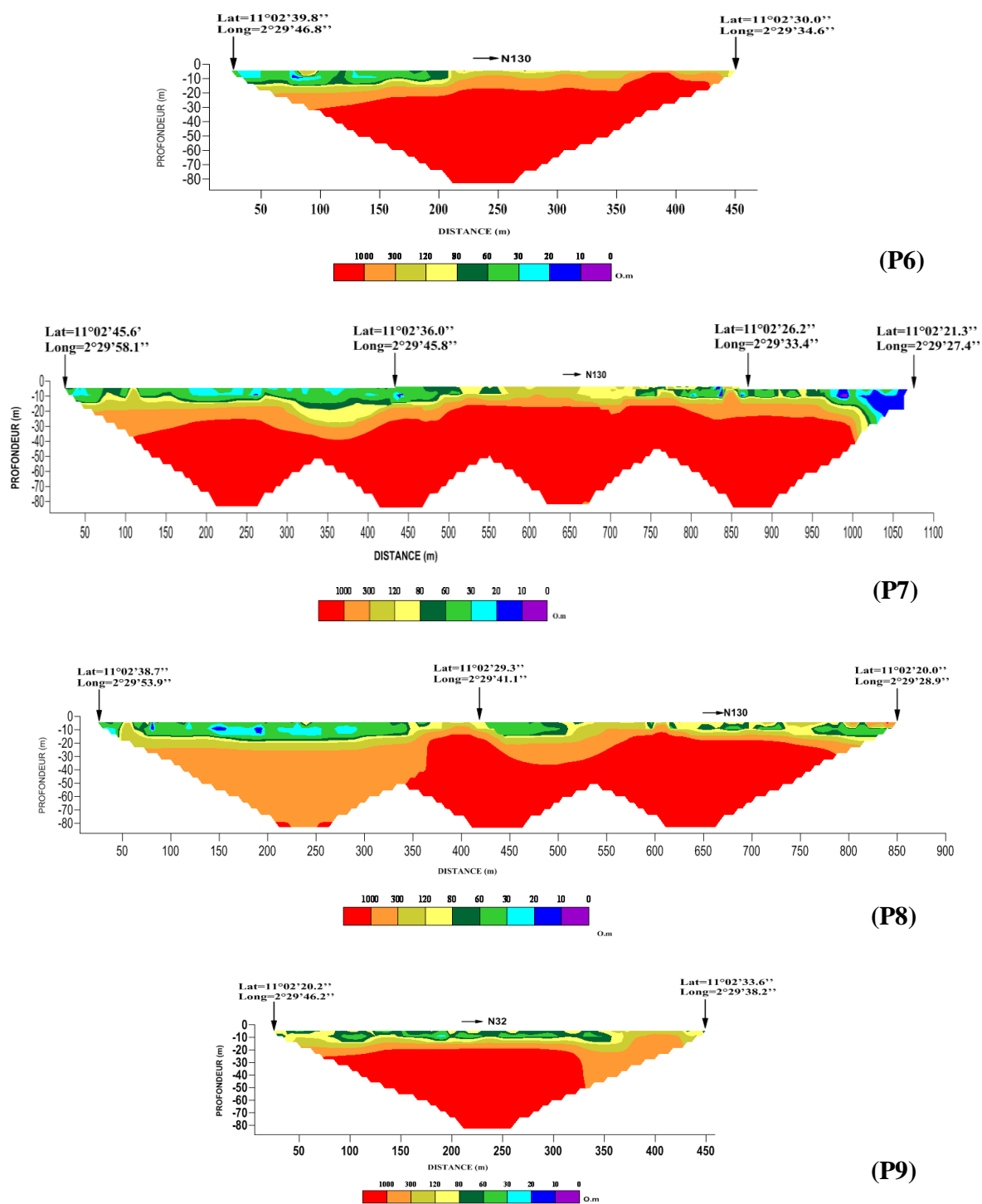


Figure 4.C.3 : Profils électriques des panneaux réalisés sur la Rive gauche.

P6 : Profil de 475 m de long passant à environ 20 m du plan d'eau rive gauche

P7 : Profil de 1190 m de long passant à environ 60 m du plan d'eau rive gauche

P8 : Profil de 950 m de long passant à environ 100 m du plan d'eau rive gauche

P8 : Profil de 475 m de long recoupant P6, P7 et P8

Annexe 5.A.

Description mathématique du modèle pluie-débit journalier GR4J

Le modèle GR4J (*Figure 5-1*) utilisé dans cette thèse est celui décrit en détail dans Perrin et al. (2007). P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle pour le même jour calendaire.

- *Neutralisation* : Détermination de la pluie nette et de l'ETP nette

La première opération est la neutralisation de P_k par E pour déterminer une pluie nette P_n et une évapotranspiration nette E_n calculée par :

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } E_n = 0 \quad (5.A.1)$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P_k \quad (5.A.2)$$

- *Fonction de rendement* : Réservoir de production

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)} \quad (5.A.3)$$

Où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)} \quad (5.A.4)$$

Le contenu du réservoir de production qui résulte de ces opérations est donné par :

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad (5.A.5)$$

- *Vidange par percolation*

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$\text{Perc} = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (5.A.6)$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - \text{Perc} \quad (5.A.7)$$

et la quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = \text{Perc} + P_n - P_s \quad (5.A.8)$$

▪ *Hydrogrammes unitaires*

La quantité d'eau P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de HU1 exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme.

SH1 est définie en fonction du temps par:

$$\begin{cases} SH1(t) = 0, & \text{pour } t \leq 0 \\ SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}, & \text{pour } 0 < t < X_4 \\ SH1(t) = 1, & \text{pour } t \geq X_4 \end{cases} \quad (5.A.9)$$

SH2 est définie de façon similaire par:

$$\begin{cases} SH2(t) = 0, & \text{pour } t \leq 0 \\ SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}, & \text{pour } 0 < t \leq X_4 \\ SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}}, & \text{pour } X_4 < t < 2X_4 \\ SH2(t) = 1, & \text{pour } t \geq 2X_4 \end{cases} \quad (5.A.10)$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$HU1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (5.A.11)$$

$$HU2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (5.A.12)$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{j=1}^l HU1(j)P_r(k-j+1) \quad (5.A.13)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^m HU2(j)P_r(k-j+1) \quad (5.A.14)$$

Où $l = \text{int}(X_4) + 1$ et $m = \text{int}(2X_4)$, $\text{int}(\cdot)$ indique la partie entière.

- *Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique*

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (5.A.15)$$

Où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- *Réservoir de routage*

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max \ 0; R_k + Q9(k) + F \quad (5.A.16)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (5.A.17)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r \quad (5.A.18)$$

- *Écoulement total*

La sortie $Q1$ de l'hydrogramme $HU2$ est soumise au même échange avec l'extérieur pour donner la composante d'écoulement Q_d :

$$Q_d = \max \ 0; Q1(k) + F \quad (5.A.19)$$

Le débit total Q_k est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d \quad (5.A.20)$$

Annexe 5.B.

Analyse statistique : test de Mann-Whitney (1947)

1. But du test

Ce test date de la moitié du XX^{ème} siècle. Le test de Mann-Whitney est utilisé lorsqu'il faut décider si deux échantillons indépendants sont issus de la même population. Il permet aussi de comparer deux méthodes de mesure. C'est un test non paramétrique : il ne fait aucune hypothèse sur la forme des distributions sous-jacentes des données (en particulier l'hypothèse de normalité n'est pas requise). Comme de nombreux tests non paramétriques, le test de Mann-Whitney repose sur la notion de *rangs* (il ne travaille pas directement sur les valeurs des observations). L'idée est de substituer aux valeurs leur numéro d'ordre dans l'ensemble des données.

2. Hypothèses du test

Les hypothèses à tester sont :

L'hypothèse nulle H_0 : « Les fonctions de distribution des deux échantillons X et Y sont identiques » ($F_X = F_Y$).

L'hypothèse alternative H_1 : « Les fonctions de distribution des deux échantillons X et Y sont différentes » (test bilatéral) ($F_X \neq F_Y$).

Ou « Les valeurs de l'échantillon X sont inférieures (respectivement supérieures) à celles de l'échantillon Y » (test unilatéral).

3. Statistique du test

Soient (X_1, \dots, X_n) et (Y_1, \dots, Y_m) deux échantillons indépendants issus de distributions continues.

Le principe du test de Mann-Whitney consiste à :

- Ranger ou classer dans l'ordre croissant l'ensemble des observations mélangées des deux échantillons de taille n et m ;
- Affecter un rang à chacune des observations
- Calculer séparément la somme des rangs des observations provenant de chacun des deux échantillons, notées Q_X et Q_Y .

En supposant que $n \leq m$, la statistique du test s'écrit :

$$U_X = nm + \frac{n(n+1)}{2} - Q_X \quad (5.B.1)$$

$$U_Y = nm + \frac{m(m+1)}{2} - Q_Y \quad (5.B.2)$$

Par conséquent, la statistique $U_{X,Y}$ du test de Mann-Whitney de l'échantillon se définit comme la plus petite des deux valeurs U_X et U_Y .

4. Règle de décision et conclusion du test

- **1^{er} cas : les tailles n ou m sont inférieures ou égales à 20**

Pour un seuil de $\alpha = 5\%$, les tables de Mann-Whitney nous fournissent une valeur critique c . Alors nous décidons :

$$\begin{aligned} \text{Si } U_{n,m,obs} \leq c, & \quad H_1 \text{ est vraie} \\ \text{Si } U_{n,m,obs} > c, & \quad H_0 \text{ est vraie} \end{aligned} \quad (5.B.3)$$

- **2nd cas : les tailles n et m sont strictement supérieures à 20**

Il est possible d'approximer une gaussienne à la loi de cette statistique par une loi normale

$$\text{d'espérance } \mu = \frac{nm}{2} \text{ et de variance } \sigma^2 = \frac{nm(n+m+1)}{12}.$$

Dans ce cas, le test revient donc à déterminer la statistique $Z_{n,m}$ et à la comparer avec les valeurs critiques d'une loi centrée réduite.

$$Z_{n,m} = \frac{|U_{n,m} - \mu|}{\sigma} \frac{1}{2} \quad (5.B.4)$$

Remarque : La quantité $\frac{1}{2}$ correspond à la correction de continuité dans l'approximation de la statistique du test par une loi normale.

Pour un seuil donné α , la table de la variable aléatoire Z normale centrée réduite nous fournit une valeur critique c $P_{(H_0)}(-c < Z_{n,m} < c) = 1 - \alpha$

$$\begin{aligned} \text{Si } Z_{n,m,obs} \in] -c; +c[, & \quad H_1 \text{ est vraie} \\ \text{Si } Z_{n,m,obs} \notin] -c; +c[, & \quad H_0 \text{ est vraie} \end{aligned} \quad (5.B.5)$$

- **3^{ème} cas : Présence des ex aequo**

Lorsqu'il y a des ex-aequos dans les valeurs, deux approches sont possibles. La méthode des rangs aléatoires attribue aléatoirement les rangs aux observations confondues. Dans ce cas, aucune modification des tables et lois asymptotiques existantes n'est nécessaire. Cependant, d'une part, la puissance du test est plus faible que celle de la méthode que nous présentons plus bas ; d'autre part, la possibilité que la conclusion du test puisse être différente d'un coup sur l'autre (selon l'attribution des rangs) n'est pas très défendable, cela arrive lorsque la statistique observée est située à la lisière de la région critique.

La méthode des rangs moyens procède de la manière suivante : les observations possédant des valeurs identiques se voient attribuer la moyenne de leurs rangs. Cette approche est plus puissante. Les statistiques de test (plus précisément leur variance) sont cependant modifiées. Nous précisons la nature de la correction à introduire lors du calcul des lois et des statistiques lorsque nous présenterons les différents tests qui composent ce chapitre.

Annexe 6.A.

Généralités sur la gestion optimale de réservoirs

La gestion des réservoirs est une tâche importante pour les gestionnaires des ressources en eau à travers le monde. Dans ce chapitre, nous essayerons de donner un cadre général de toute démarche de la modélisation des problèmes de gestion des réservoirs.

1. Concepts de Base

Pour le gestionnaire d'un réservoir hydraulique, la gestion résulte en une séquence de décisions portant sur la répartition dans le temps et entre les différents usagers, des volumes d'eau disponibles. Ces décisions sont généralement guidées par des règles de gestion (Fang, 1988; Khan & Tingsanchali, 2009). Gérer un réservoir de façon « optimale » consiste à définir une série de décisions de lâchers (lâchers optimum) qui maximisent le(s) critère(s) de satisfaction sur l'ensemble de la période de gestion.

L'élaboration d'un modèle de gestion de réservoirs se base sur l'identification des états du système et des variables de décision, sur la formulation des fonctions objectifs et des contraintes du système, et sur le choix de la technique d'optimisation (Pabiot, 1999).

Les états du système : Ils représentent la situation des différents flux au niveau des réservoirs à une date donnée. L'état du système est souvent défini par le stock d'eau au début de la période ; les apports et les demandes en eau pendant la période lorsque les pertes par évaporation et infiltration ne sont pas considérées.

Les variables de décision ou de contrôle : C'est le levier sur lequel doit agir le gestionnaire du réservoir. Ces variables permettent de changer les états du système à un instant donné.

Le vecteur de décisions : C'est le vecteur correspondant à l'ensemble des variables du problème.

La fonction objectif encore appelée *fonction coût* ou *critère d'optimisation* : C'est le « cœur » des modèles d'optimisation (Wurbs, 1991). C'est la fonction mathématique qui traduit le (s) but (s) de la gestion. Elle permet d'évaluer les performances du système en termes de défaillances ou de gains.

La fonction d'évolution du système : C'est la fonction qui traduit les variations dans le temps des différents flux au niveau de la retenue. Elle est bâtie sur l'équation de conservation des volumes et exprime le caractère dynamique de la gestion.

Les contraintes du système qui définissent les limites de l'espace de décisions. Elles peuvent être d'ordre physique, d'ordre hydraulique ou d'ordre institutionnel.

Le choix du *pas de temps* de gestion (journalier, hebdomadaire, décadaire, mensuel ou annuel). Nous avons opté pour le pas de temps mensuel, qui est une échelle temporelle adéquate pour les gestionnaires des réservoirs hydrauliques dans un environnement où les données journalières sont souvent moins accessibles.

Le système peut être représenté d'un pas de temps à un autre selon deux évolutions : une évolution déterministe qui utilise des données d'entrées connues *a priori* et une évolution stochastique qui utilise des données d'entrées définies par un aléa. L'optimisation de la gestion des réservoirs peut donc se faire dans un contexte d'avenir certain ou incertain.

2. Modèle conceptuel général pour la gestion de l'eau

Le modèle conceptuel est basé sur un cadre unique où toutes les sources d'approvisionnement, les sites de demande et les liaisons de transmission sont présentés. Dans le modèle conceptuel proposé (*Figure 6.A.1*), les sources sont représentées par des rectangles (aquifères: G) et par des triangles (réservoirs de surface: S) avec des indices « g^w » et « sw ». Les sites de demande « D » sont représentés par des cercles avec les indices « d ». Les connexions entre les nœuds du modèle (sources et sites de demande) sont assurées par les liaisons d'approvisionnement et de percolation matérialisées sur la *Figure 6.A.1* respectivement par les traits continus et les traits interrompus.

Dans un domaine de gestion donné, plusieurs sources avec différentes capacités de stockage peuvent être utilisées pour satisfaire les exigences en eau des sites de demande. Pour les réservoirs souterrains, la capacité de stockage correspond au volume maximum que l'aquifère peut emmagasiner. On s'intéressera dans cette étude à la recharge de l'aquifère due par infiltration à partir des réservoirs de surface « $V_i(sw, gw)$ » et par percolation profonde au niveau des parcelles « $DP(d, gw)$ ». Pour les réservoirs de surface, la capacité de stockage correspond au volume maximum qui peut être stocké. Cette capacité est généralement définie par la topographie et la cote du déversoir.

On suppose également que, chaque site de demande doit être alimenté par au moins une source d'approvisionnement à travers des liaisons de transmission dont les caractéristiques devraient être précisées notamment la fourniture maximale « $F_{\max} D(se, d)$ » et les coûts unitaires d'approvisionnement. L'usage de l'indice « se » indique que l'information est valable pour les deux catégories de sources d'approvisionnement.

Les réservoirs de surface sont alimentés par les apports de leur bassin versant « $I(sw)$ » et subissent des pertes par évaporation nette « $E(sw)$ ».

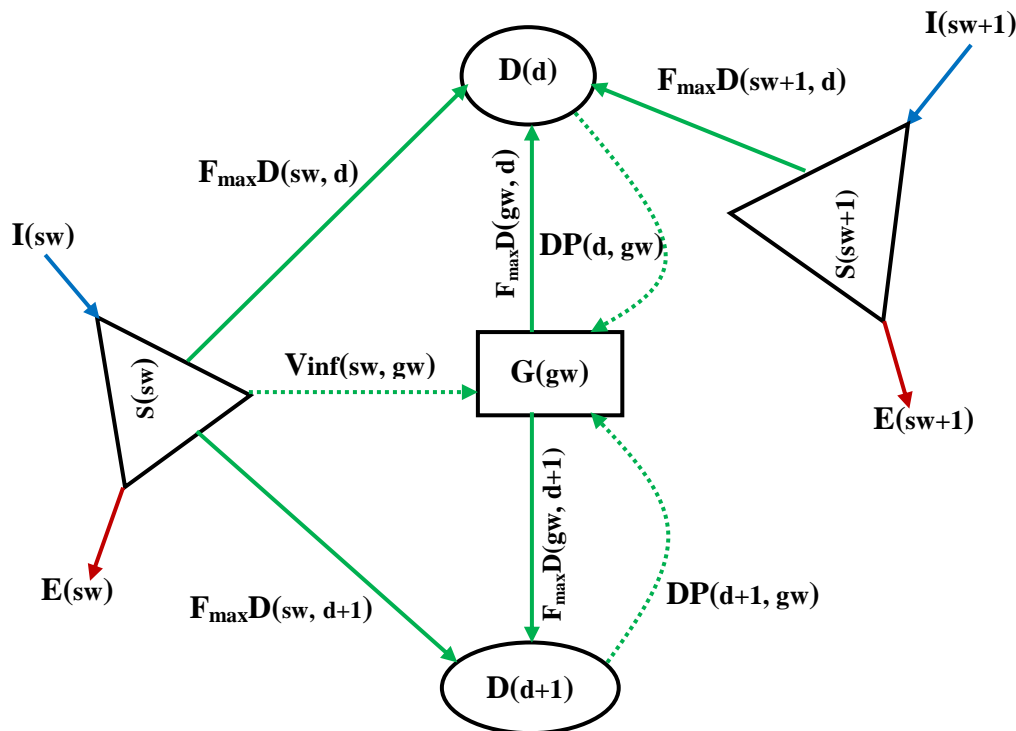


Figure 6.A.1 : Connectivité entre les sources d'eau et les sites de demandes dans un domaine de gestion (d'après Nouri, 2014)

3. Formulation du problème de gestion optimale des réservoirs

Comme mentionné au chapitre 2, les réservoirs sont destinés à satisfaire un ou plusieurs objectifs. On peut citer en rappel : la régulation des débits d'apports et la satisfaction des diverses demandes d'utilisation de l'eau. La connaissance de ces objectifs vont permettre de définir la gestion du système (Parent, 1991; Pabiot, 1999).

Les problèmes de gestion des ressources en eau sont le plus souvent formulés sous forme multi-objectifs. Ce n'est pas facile d'estimer les stratégies de fonctionnement des réservoirs qui maximisent tous les enjeux qu'offrent ces réservoirs, et permettent aussi de minimiser leurs impacts négatifs. Une difficulté majeure dans la gestion des réservoirs est le fait que les objectifs sont parfois conflictuels et non commensurables⁸ (Iftikhar, 2009; Malekmohammadi et al., 2011). Par conséquent, il est nécessaire d'optimiser le fonctionnement des réservoirs en déterminant les meilleurs compromis entre les objectifs contradictoires (Le Ngo, 2006; Adeyemo, 2011).

Les principaux objectifs pris en considération dans la plupart des modèles d'optimisation des réservoirs sont :

⁸ Les objectifs sont exprimés dans des unités différentes

- Minimiser la non satisfaction des demandes des différents usagers (Zahraie & Hosseini, 2009; Chang et al., 2010; Chen et al., 2012; Nouri, 2014);
- Maximiser les rendements agricoles ou la production hydro-électricité sur une période (Reddy & Kumar, 2006; Chen et al., 2013; Noori et al., 2013);
- Maximiser les bénéfiques nets ou revenus issus de la production agricole ou de la production de l'hydro-électricité (Suiadee & Tingsanchali, 2007) ;
- Maximiser les fiabilités des demandes spécifiées ;
- Minimiser les fréquences des épisodes de restriction ;
- Minimiser les coûts effectifs d'approvisionnement en eau (Nouri, 2014) ;
- Minimiser les risques d'inondations (Le Ngo et al., 2007; Dittmann et al., 2009);
- Intégrer les aspects environnementaux et sociaux (Castelletti et al., 2008; Chang et al., 2010; Chen et al., 2012, 2013; Cai et al., 2013).

Ces objectifs sont exprimés en termes de fiabilité ou de disponibilité en eau, d'utilité et de revenus économiques (Wurbs, 1991; Baptiste, 2013). Les contraintes sur les variables d'état et de décision appliquées à la gestion d'un réservoir sont généralement d'ordre hydraulique, d'ordre physique et d'ordre institutionnel, légal ou contractuel (Yeh, 1985). Ces contraintes incluent :

- *Les limites acceptables de stockage et de niveaux du réservoir*

$$V_{\min} \leq V^t \leq V_{\max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6.A.1)$$

$$h_{\min} \leq h^t \leq h_{\max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6.A.2)$$

V_{\min} : Le stock minimum du réservoir correspondant à la cote de prise d'eau h_{\min} en dessous duquel il y aurait des problèmes d'exploitation. Cette valeur est connue avec la matérialisation de l'ouvrage de prise d'eau ;

V_{\max} : La capacité de stockage maximale du réservoir. Elle est connue avec la cote du seuil du déversoir h_{\max} ;

T : L'horizon temporel de gestion.

- *Les capacités de prélèvements d'eau (Capacités de la vanne, des conduites)*

$$F_{\min} \leq F^t \leq F_{\max} \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6.A.3)$$

F_{\min} : Le volume minimum lâché du réservoir. Cette grandeur peut être nulle en l'absence des débits écologiques ou réservés. C'est une contrainte d'ordre institutionnel (Parent, 1991 ; Chen et al., 2012);

F_{\max} : Le volume d'eau maximum fourni en aval d'un réservoir qui est limité par le dimensionnement des ouvrages de prise d'eau. Cette valeur ne devrait jamais excéder la capacité maximale du réservoir ;

- *L'équation de conservation des volumes du barrage doit être respectée à chaque pas de temps de gestion*

$$V^t = V^{t-\Delta t} + I^t - O^t \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6.A.4)$$

V^t : Le volume stocké dans le réservoir à une date t

$V^{t-\Delta t}$: Le volume stocké dans le réservoir à une date $t - \Delta t$

I^t : Les apports dans le réservoir entre $t - \Delta t$ et t

O^t : Les sorties du réservoir entre $t - \Delta t$ et t

Les problèmes d'optimisation peuvent être des problèmes mono-objectif ou multi-objectif. Dans le cas d'un problème d'optimisation mono-objectif, il s'agit de définir le maximum ou le minimum d'une fonction objectif, dépendant du but visé (cas des barrages à but unique). Cependant, la plupart des problèmes d'optimisation réels sont décrits à l'aide de plusieurs objectifs généralement conflictuels devant être optimisés simultanément (Le Ngo et al., 2007; Boussaïd, 2013). Il s'agit des problèmes multi-objectifs.

Un problème d'optimisation multi-objectif (dit aussi multicritère) peut être défini comme étant la recherche d'un vecteur de variables décisionnelles qui satisfait un ensemble de contraintes et optimise (maximise ou minimise) un vecteur de fonctions dont les éléments représentent les fonctions objectifs considérées (Merdjaoui, 2006; Chen et al., 2007). En général, un problème d'optimisation multi-objectif peut donc être formalisé comme suit (Coello Coello, 2001; Le Ngo, 2006; Deb, 2011) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \\ \text{tel que} \\ g_j(x) \leq 0 \quad j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{array} \right. \quad (6.A.5)$$

Où $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ est le vecteur des variables de décision ; x_i une variable du problème bornée par $x_i^{(L)}$ (inférieure) et $x_i^{(U)}$ (supérieure) ; $F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$ est le vecteur des fonctions objectifs à optimiser avec $k \geq 2$ le nombre de fonctions objectifs,

et $g_j(x)$ sont les m contraintes (d'égalité et d'inégalité) qui définissent l'espace des solutions réalisables.

Contrairement à l'optimisation mono-objectif, la solution d'un problème multi-objectif n'est pas une solution unique, mais un ensemble de solutions, connu comme l'ensemble des « *meilleurs compromis* » ou l'ensemble des solutions « *Pareto optimales* » (Coello Coello et al., 2002; Dittmann et al., 2009).

Annexe 6.B.

Approche de résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs

Un grand nombre d'approches a été présenté dans la littérature pour résoudre les problèmes multi-objectifs. Selon la façon de traiter les objectifs, ces approches peuvent être subdivisées en deux classes : les approches basées sur la transformation (ou approches non Pareto) et les approches Pareto (Le Ngo, 2006).

Les approches basées sur la transformation ne traitent pas le problème comme un véritable problème multi-objectif. Elles cherchent à ramener le problème initial à un problème mono-objectif. Par opposition aux méthodes de transformation, les approches Pareto ne transforment pas les objectifs du problème, ceux-ci sont traités sans aucune distinction pendant la résolution (Collette & Siarry, 2002; Merdjaoui, 2006). Dans les approches de transformation, les priorités des objectifs sont établies à travers les préférences du décideur : on parle aussi de méthodes *a priori*. Par contre, dans les approches Pareto, aucune préférence n'est considérée avant le processus de recherche des solutions. Le décideur opère son choix à la fin du processus : on parle aussi de méthodes *a posteriori*.

1. Méthodes à base de transformation

Il existe plusieurs méthodes pour transformer un problème d'optimisation multi-objectif en un problème mono-objectif. Parmi ces méthodes on trouve : les méthodes d'agrégation, les méthodes de contrainte, les méthodes dites du but programmé et les méthodes min-max (Loucks & Van Beek, 2005). Les 2 premières méthodes couramment utilisées sont présentées ci-dessous.

♣ Méthode d'agrégation

Cette méthode consiste à combiner généralement de façon linéaire (somme pondérée), toutes les fonctions objectifs du problème en une seule fonction, en affectant à chacune d'elle un coefficient de pondération. Ce coefficient représente l'importance relative que le décideur attribue à chaque objectif (Talbi, 1999; Parmee et al., 2000; Khu & Madsen, 2005). La nouvelle fonction objectif construite est exprimée par l'équation (6.6) :

$$F(x) = \sum_{q=1}^k w_q f_q(x) \quad (6.B.1)$$

$$\sum_{q=1}^k w_q = 1 \quad (6.B.2)$$

Où $w_q \in [0, 1]$ est le coefficient de pondération (encore appelé poids) affecté à l'objectif q . L'utilisation de cette méthode impose que les objectifs soient commensurables (exprimés dans la même unité).

♣ Méthode de contraintes

Cette méthode encore appelée *méthode du compromis*, consiste à convertir $k-1$ des k objectifs du problème en contraintes et d'optimiser séparément l'objectif restant (Ritzel et al., 1994; Wang et al., 2005). En général, l'objectif choisi est celui que le décideur souhaite optimiser en priorité. Le problème peut être reformulé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} F(x) &= f_q(x) \\ \text{tel que } f_{q'}(x) &\leq \varepsilon_{q'}, \quad q' \in \{1, 2, \dots, k\} \wedge q' \neq q \end{aligned} \quad (6.B.3)$$

La solution optimale peut être identifiée après que tous les objectifs ont été considérés comme objectifs prioritaires et les autres critères transformés en contraintes.

♣ Limites des méthodes à base de transformation

Ces approches de résolution par transformation, d'une grande efficacité sont confrontées à de nombreuses difficultés (Talbi, 1999; Collette & Siarry, 2002). On peut énumérer :

- Le choix judicieux du vecteur de poids affectés aux fonctions objectifs. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance a priori du problème;
- La surface de compromis ou la frontière de Pareto n'est pas intégralement calculée lorsque celle-ci n'est pas convexe (méthode d'agrégation) ;
- La nécessité d'exécuter un grand nombre de fois le processus de résolution ;
- La sensibilité à un changement d'échelle et la compensation des objectifs ;
- La connaissance a priori des intervalles appropriés pour les valeurs de $\varepsilon_{q'}$ requise pour tous les objectifs.

2. Méthodes basées sur Pareto

Les approches Pareto utilisent directement la notion de dominance pour sélectionner des solutions faisant converger la population vers un ensemble de solutions qui approchent avec justesse la frontière de Pareto (Talbi, 1999; Khu & Madsen, 2005; Cooren, 2008). Elles permettent de déterminer en une seule exécution une approximation de l'intégralité des solutions Pareto optimales, et ceci même si les problèmes sont non convexes (Adeyemo, 2011). Il existe un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères.

Pour tous les détails relatifs au front de Pareto, on pourra se référer aux travaux de Degoutin (2002), Barichard (2003) et Merdjaoui (2006). Les méthodes de résolution dites Pareto sont fondées sur des métaheuristiques notamment les approches évolutionnaires et les méthodes de recherche locale. Les méthodes de recherche évolutionnaires telles que les algorithmes génétiques semblent plus appropriés à la résolution des problèmes multi-objectifs parce qu'ils traitent simultanément un ensemble de solutions possibles.

Annexe 6.C.

Algorithmes de résolution : Algorithmes Evolutionnaires

1. Principe de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire

Un algorithme évolutionnaire (AE) est typiquement composé de trois éléments fondamentaux : une population constituée de plusieurs individus, un mécanisme d'évaluation des individus et un mécanisme d'évolution de la population.

Le principe de fonctionnement d'un AE est présenté par l'organigramme de la **Figure 6.C.1**. On part d'un ensemble initial d'individus nommé « *population parent initiale* » et générée le plus souvent aléatoirement, dans le but de guider efficacement la recherche vers de bonnes solutions dans l'espace de recherche. Ensuite, on évalue la performance de chaque individu en calculant la valeur de la *fonction d'adaptation* (ou *fitness*). L'application des trois opérateurs génétiques de « *sélection, croisement et mutation* » permet de créer un nouvel ensemble d'individus appelé « *population enfant* ». Cette population est évaluée à son tour pour indiquer la performance de chacun de ses individus. Cette connaissance de scores des individus permet de décider lesquels des individus enfants méritent de remplacer certains parents. La nouvelle population obtenue, appelée « *population parent* », constitue la population parent de la nouvelle génération. Ce processus est itéré, de génération en génération, jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt. Il existe plusieurs manières de décider de l'arrêt d'un AE (Marouene, 2010; Boussaïd, 2013) :

- La spécification d'un nombre maximal de générations fixé a priori ;
- La population devient stable et converge vers un optimum ;
- L'atteinte d'un seuil fixé pour la valeur de la fonction d'adaptation.

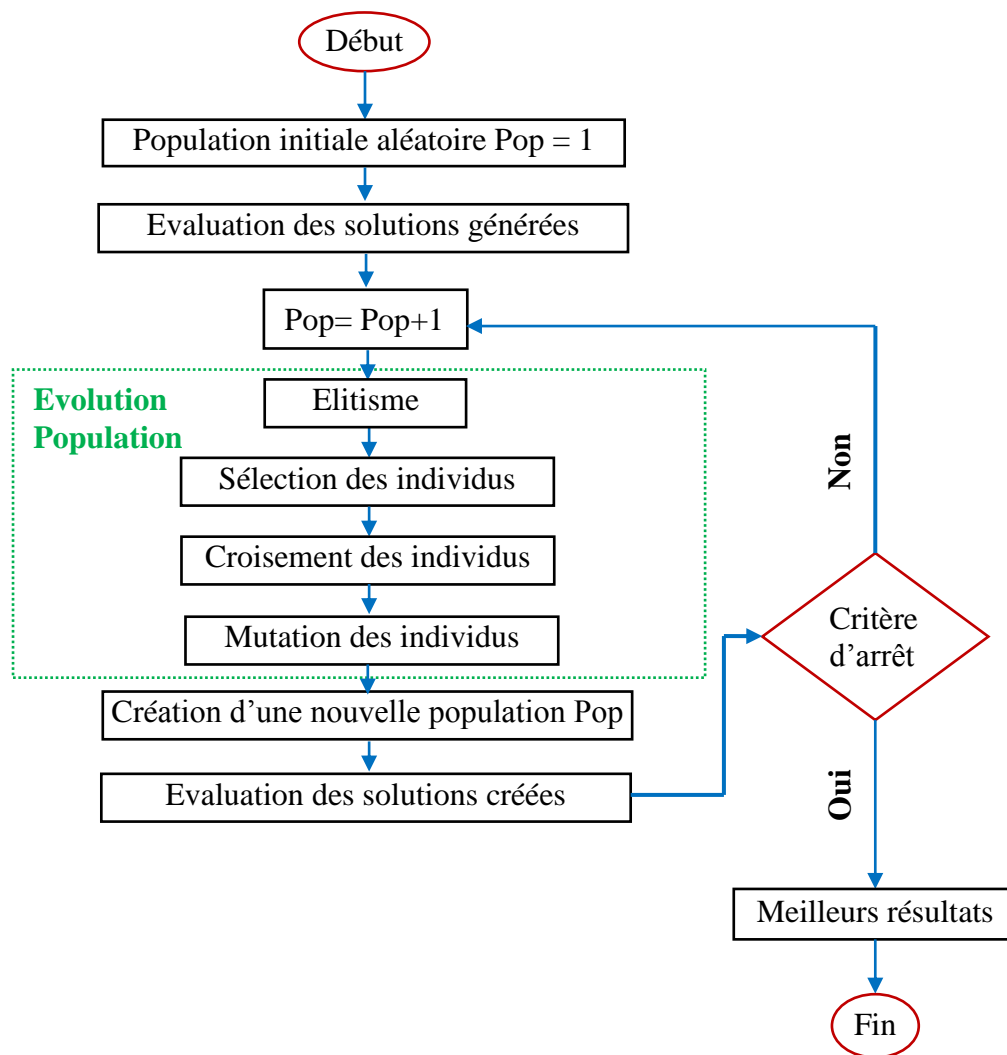


Figure 6.C.1 : Organigramme de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire.

Source : Adaptée de Dreco et al., 2003

2. Algorithmes génétiques

♣ Historique de l'algorithme génétique

Les origines des algorithmes génétiques (AGs) remontent au début des années 1970, avec les travaux de John Holland et ses étudiants à l'Université du Michigan aux Etats-Unis sur les systèmes adaptatifs (Holland, 1975). L'essor de cette technique d'optimisation est marqué par les travaux de Goldberg (1989). Ces algorithmes s'inspirent des principes de la génétique (la survie des individus les mieux adaptés à un environnement, la recombinaison génétique, quelquefois l'apparition d'une mutation).

Au cours des années 1990, les AGs ont été adaptés pour remédier aux problèmes d'optimisation en développant une analogie entre un individu dans une population et une solution d'un problème dans un ensemble de solutions (Davis & Principe, 1991).

Goldberg (1989) a précisé que les AGs surpassent les méthodes classiques dans la conquête de la robustesse par quatre différences principales :

- Les AGs utilisent un codage des éléments de l'espace de recherche et non les éléments eux-mêmes;
- Ils travaillent sur une population de solutions, au lieu d'une solution unique;
- Les AGs n'utilisent que les valeurs des fonctions à optimiser, pas leur dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire;
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

♣ Paramétrage de l'algorithme génétique

i) Représentation des solutions ou codage des variables

Un individu est une chaîne de longueur ℓ (taille de la solution) codant une solution potentielle au problème à résoudre. La qualité du codage des données conditionne le succès des AGs. Il existe plusieurs façons de représenter les solutions dans la population (Haj-Rachid et al., 2010). Les plus utilisées sont la représentation binaire et la représentation réelle ou entière. Dans notre cas, il s'agira d'un problème d'optimisation avec les variables réelles. Les études antérieures ont montré la supériorité du codage réel sur le codage binaire pour optimiser les paramètres réels (Ono et al., 1999; Deb, 2001).

ii) Evaluation des solutions

En optimisation par AGs, la performance d'une solution est évaluée par une fonction d'adaptation positive, dépendant de la fonction objectif du problème à optimiser. L'algorithme recherche la solution candidate qui présente l'adaptation maximale. Ainsi, chaque solution « x » est évaluée par le calcul de sa fonction objectif « $f(x)$ ». Lorsqu'il s'agit d'un problème de maximisation, la fonction d'adaptation peut correspondre à la fonction objectif. Au contraire, dans le cas d'un problème de minimisation, les grandes valeurs de la fonction d'adaptation doivent correspondre aux faibles valeurs de la fonction objectif. Ainsi, il serait nécessaire de transformer la fonction objectif pour refléter cette interdépendance. Back et al. (2000) et Dreco et al. (2003) ont présenté différentes possibilités de transformations des fonctions objectifs en fonctions d'adaptation.

iii) Opérateur de sélection

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire ou être remplacés. A chaque génération, les individus se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action de deux opérateurs de sélection : sélection pour la reproduction et

sélection pour le remplacement. Ces opérateurs ne créent pas de nouveaux individus mais identifient les individus sur la base de leur fonction d'adaptation (Back et al., 2000; Dréo et al., 2003). Il existe plusieurs méthodes de sélection, dont trois sont couramment utilisées (Goldberg & Deb, 1991) :

- Sélection proportionnelle
- Sélection par tournoi
- Sélection selon le rang de l'individu ou sélection déterministe

Nous avons opté dans cette étude, la sélection par tournoi. Cette méthode donne la chance aux individus de très mauvais scores mais ayant des gènes avantageux dans leur chaîne à participer à la reproduction.

La sélection par tournoi consiste donc à tirer aléatoirement un sous-ensemble d'individus (k_s) de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu dans ce groupe en fonction de sa fitness. Le nombre k représente la taille du tournoi. La méthode de tournoi la plus commune est le *tournoi binaire*, où on choisit deux individus aléatoirement ($k_s = 2$), la sélection est dite par « *tournoi binaire* ». Le tournoi est refait à chaque fois, avec ou sans remise, jusqu'à ce que le nombre d'individus nécessaires pour le croisement soit atteint.

iv) Opérateur de croisement (crossover ou recombinaison)

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes. Le croisement est généralement opéré entre les individus sélectionnés pour la reproduction. Les nombreuses techniques de croisement diffèrent par le nombre de points de croisement « pc » et/ou par le mode d'échange du matériel génétique. La position du ou des points de croisement sur la chaîne de l'individu sont choisis aléatoirement entre 1 et $\ell - 1$ (ℓ est la longueur de la chaîne d'un chromosome). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions $pc + 1$ et ℓ inclusivement. Le croisement est généralement réalisé avec des valeurs de probabilité (taux de croisement) qui varie entre 60 et 95% (Cao & Wu, 1999; Dréo et al., 2003; Pelikan et al., 2003). Ce taux de croisement représente la proportion de la population de parents qui sera utilisée par un opérateur de croisement (Haj-Rachid et al., 2010).

Dans cette étude, nous avons utilisé un codage réel, ce qui oblige l'obtention d'un croisement réel. La technique de croisement arithmétique entre deux parents (x_1 et x_2) pour produire deux enfants (x_1' et x_2') est retenue pour ce travail (Back et al., 2000). Cette méthode de

croisement est très adaptée pour les problèmes avec contraintes. Les valeurs de chaque gène « i » soient calculées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} x'_{1i} = \alpha * x_{1i} + (1 - \alpha) * x_{2i} \\ x'_{2i} = (1 - \alpha) * x_{1i} + \alpha * x_{2i} \end{cases} \quad (6.C.1)$$

Où α est le pourcentage de participation du premier parent dans les solutions créées.

La **Figure 6.C.2** illustre un exemple de croisement à un point dans le cas d'un codage binaire, qui consiste à échanger les segments des deux parents déterminés par le point de croisement.

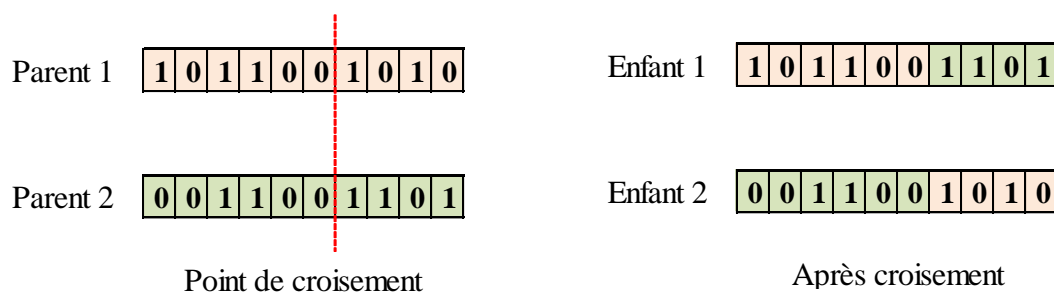


Figure 6.C.2 : Exemple d'opérateur de croisement en représentation binaire.

v) Opérateur de mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité (0,1 à 10%) de la valeur d'un gène de la chaîne (Schaffer et al., 1989; Cao & Wu, 1999; Dréo et al., 2003). Une probabilité trop grande étant susceptible de modifier les meilleurs individus. Les taux de mutation peuvent aussi prendre une valeur égale $1/\ell$ où ℓ est la longueur de la chaîne de bits codant le chromosome. Pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa. Cet opérateur ne crée généralement pas de meilleurs individus, mais il introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local (Gildemyn, 2008).

Dans le cas d'un codage réel, il existe de nombreuses méthodes de mutation telles que la mutation aléatoire, la mutation non uniforme, la mutation distribuée normalement et la mutation polynomiale (Deb, 2001). La forme générale d'un parent x en une nouvelle solution x' est :

$$x' = x + m' \quad (6.C.2)$$

Où m' est une variable aléatoire de moyenne nulle.

La **Figure 6.C.3** montre un exemple de mutation sur un chromosome codé de 10 bits.

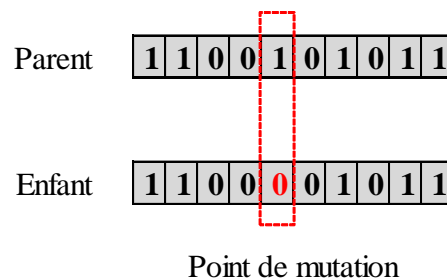


Figure 6.C.3 : Exemple d'opérateur de mutation en représentation binaire.

vi) Mécanisme d'évolution des générations

La stratégie d'évolution définit les mécanismes qui permettent de passer d'une génération à une autre. On distingue trois processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste. La stratégie élitiste est choisie dans notre cas d'étude. Elle a l'avantage de préserver les meilleurs individus de chaque population et de les copier dans la nouvelle population créée, sans intervention des opérateurs génétiques (Nouiri et al., 2005). Le nombre d'élites dépend de la probabilité de croisement et de la taille de la population.

vii) Paramètres de l'algorithme génétique

Les étapes de calcul d'un AG avec les opérateurs précédents, dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme :

- Taille de la population : c'est le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger ou converger prématurément vers un optimum local, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue. Se basant sur ses propres expériences, Alander (1992) propose une valeur comprise entre ℓ et $2*\ell$ (ℓ étant la longueur d'un chromosome) ;
- Probabilités de croisement et de mutation. Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre ;
- Critère d'arrêt de l'algorithme.

3. AGs mono-objectif et AGs multi-objectif

On distingue deux catégories d'AGs : les AGs mono-objectif et les AGs multi-objectif. Ils sont respectivement utilisés pour l'optimisation des problèmes à objectif unique et des problèmes à plusieurs objectifs. Les AGs mono-objectif et les AGs multi-objectif diffèrent par la façon d'évaluer les solutions, les méthodes de sélection et les stratégies d'évolution (Nouiri, 2007). Dans le cas mono-objectif, il est simple de retourner la solution optimale d'une population, tandis que dans le cas multi-objectif, la situation est très différente. Suivant la dimension de l'espace de recherche, les individus d'une population peuvent être

incomparables entre eux, chacun représentant un compromis entre plusieurs objectifs. Ainsi, le résultat d'un AG multi-objectif est donc en général l'ensemble des solutions non dominées connu sous l'appellation « *optimum de Pareto* ».

La description des AGs faite à la section 2 est valable pour les AGs mono-objectif. La méthode utilisée dans cette thèse pour résoudre la phase d'optimisation est l'AG mono-objectif.

Annexe 6.D.

Critères quantitatifs d'évaluation de la performance du système : critères RRV

1. Fiabilité

Plusieurs auteurs ont considéré les aspects de fiabilité dans la gestion d'un réservoir unique. Elle est parfois prise comme l'opposée du risque. Il existe plusieurs variantes de la fiabilité utilisées en gestion des ressources en eau : la fiabilité basée sur le temps (mensuelle, annuelle), la fiabilité basée sur la quantité (volumes) et la fiabilité basée sur l'occurrence (Wurbs, 1991; Kundzewicz & Kindler, 1995; Loucks & Van Beek, 2005; McMahon et al., 2006; Mathlouthi & Lebdi, 2008).

Dans cette étude nous utiliserons la fiabilité basée sur le temps. Elle estime la proportion d'intervalles de temps pendant lesquels le système est dans un état satisfaisant durant la période de simulation. Elle s'obtient à partir de l'équation suivante :

$$Fia_t(\%) = 100 \times \frac{Ns}{NT} \quad (6.D.1)$$

Où Ns est le nombre de mois pendant lequel la demande est satisfaite ou bien le système est dans un état satisfaisant et NT le nombre total de mois de la période de simulation.

2. Résilience

Selon Hashimoto et al. (1982) un système est plus résilient si la mesure de la résilience est plus élevée c'est-à-dire qu'il retrouve rapidement un état normal après une défaillance. Elle s'exprime par l'équation:

$$Res_H = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_j \right\}^{-1} \quad (6.D.2)$$

Avec d_j la durée du $j^{\text{ème}}$ épisode défaillant et M le nombre d'épisodes de défaillances. La résilience est exprimée par unité de temps⁻¹. Les réservoirs avec une résilience proche de zéro nécessitent plus de temps pour retourner à un état satisfaisant après une défaillance.

3. Vulnérabilité

Selon Hashimoto et al. (1982), la vulnérabilité peut s'exprimer par les équations suivantes :

$$\text{Vul}_H = \sum_j p_j v_j \quad (6.D.3a)$$

$$\text{Vul}_H = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v_j \quad (6.D.3b)$$

Où Vul_H est la mesure de vulnérabilité, p_j est la probabilité d'occurrence du $j^{\text{ème}}$ épisode défaillant et v_j le plus grand écart à l'objectif constaté durant le $j^{\text{ème}}$ épisode défaillant.

Hashimoto et al. (1982) considère que tous les épisodes défaillants ont la même probabilité d'occurrence p_j ($p_1 = p_2 = \dots = p_M = 1/M$ avec M le nombre d'épisodes défaillants). Un système est plus vulnérable si le déficit de demande en eau est plus important.

Le calcul des critères quantitatifs est illustré à partir d'un exemple très simplifié (**Figure 6.D.1**). Sur cet exemple, on peut remarquer que le scénario 1 avec la courbe en bleu présente deux épisodes de défaillance avec un échec par épisode, contrairement au scénario 2 en rouge où on observe juste un épisode de défaillance avec 3 échecs. La fiabilité correspondante au scénario 1 est 80% tandis que la fiabilité du scénario 2 est 70%. Quant à la résilience, elle vaut 1 temps^{-1} pour le scénario 1 et $1/3 \text{ temps}^{-1}$ pour le scénario 2. Les vulnérabilités correspondantes au scénario 1 et au scénario 2 sont respectivement 1,3 et 0,67.

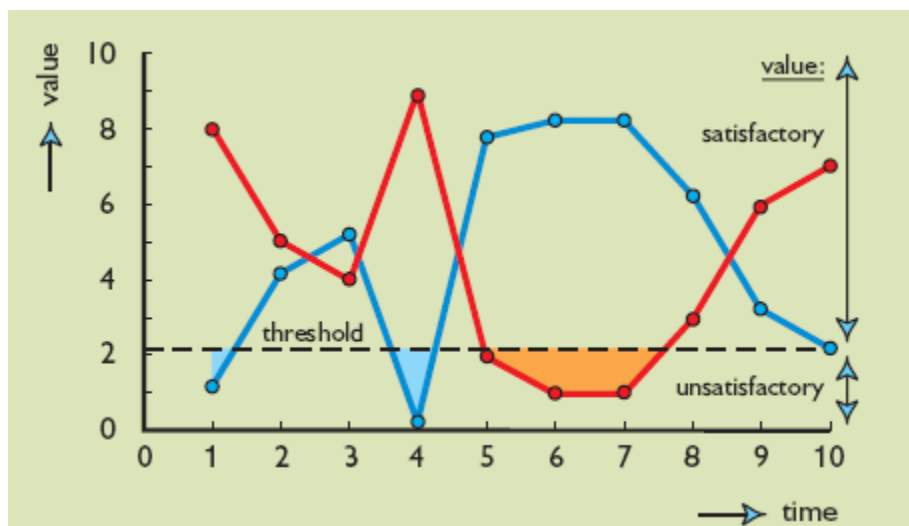


Figure 6.D.1 : Schéma de principe : La ligne en tiretés représente la valeur cible (ou « threshold ») telle que toute valeur inférieure est considérée insatisfaisante. Cette valeur cible divise les séries de données des deux scénarios (courbes en bleu et en rouge) en états satisfaits (ou « satisfactory ») et non satisfaits (ou « unsatisfactory »)(d'après Loucks & Van Beek, 2005).

Annexe 6.E.

Reformulation des fonctions objectifs f_{DNS} et f_{WP} dans le cas de la gestion avec l'aquifère comme source d'approvisionnement

La fonction objectif liée à la satisfaction de la demande serait améliorée de la façon suivante :

$$f_{DNS}^* = \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\frac{\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t + \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t - D_d^t}{\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{\max} D_{sw,d} + \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{\max} D_{gw,d}} \right)^2 \quad (6.E.1)$$

Où $F_{\max} D_{sw,d}$ la fourniture maximale d'eau à partir des sources gw au site de demande d .

La fonction objectif relative à la productivité physique subirait aussi des modifications et deviendrait :

$$f_{WP}^* = \left(\frac{WP_{\max} - WP^*}{WP_{\max}} \right)^2 \quad (6.E.2)$$

$$WP^* = \frac{\sum_{d=1}^{ND} \sum_{cp=1}^{Ncp} \omega_{cp} \times Y_{d,cp}^* \times A_{d,cp}}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t + \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t \right)} \quad (6.E.3)$$

$$\frac{Y_{d,cp}^*}{Y_{\max_cp}} = 1 - \sum_{t=\Delta t}^T k_{ycp}^t \times \left(1 - \frac{\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t + \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t}{D_d^t} \right) \quad (6.E.4)$$

Pour les aquifères gw , les apports I_{gw}^t et les sorties O_{gw}^t sont définis par :

$$I_{gw}^t = V_{i_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} i_d \times 1 - \alpha_d \times BP_d^t \quad (6.E.5)$$

$$O_{gw}^t = \sum_{d=1}^{ND} F_{gw,d}^t \quad (6.E.6)$$

Le nombre de variables de décision qui correspond à la taille d'une solution est déterminé à partir de l'équation (6.E.7) :

$$TS^* = ND \times (N_{sw} + N_{gw}) \times \frac{T}{\Delta t} \quad (6.E.7)$$

Annexe 6.F.

Evolution des fonctions critères avec l'aquifère comme source d'approvisionnement

En tenant compte de tous les paramètres, le nombre de variables décisionnelles du prototype du système optimisé est égal à 24. La longueur d'un chromosome correspond à 24 gènes. Les opérateurs du *Tableau 6-2* restent valables. L'analyse de sensibilité s'est faite sur les paramètres de l'AG. Les premiers tests ont convergé avec les paramètres de l'AG prenant les valeurs 1000 ; 50 ; 0,8 et 0,01 correspondant respectivement au nombre maximum de générations, à la taille de la population, à la probabilité de croisement et à la probabilité de mutation.

La tendance à la convergence de l'AG avec les paramètres mentionnés ci-dessus est présentée sur la *Figure 6.F.1*. Comme on peut l'observer sur ce graphique, 95% du maximum de la valeur de fitness est atteint lorsque le nombre de générations est compris entre 150 et 200.

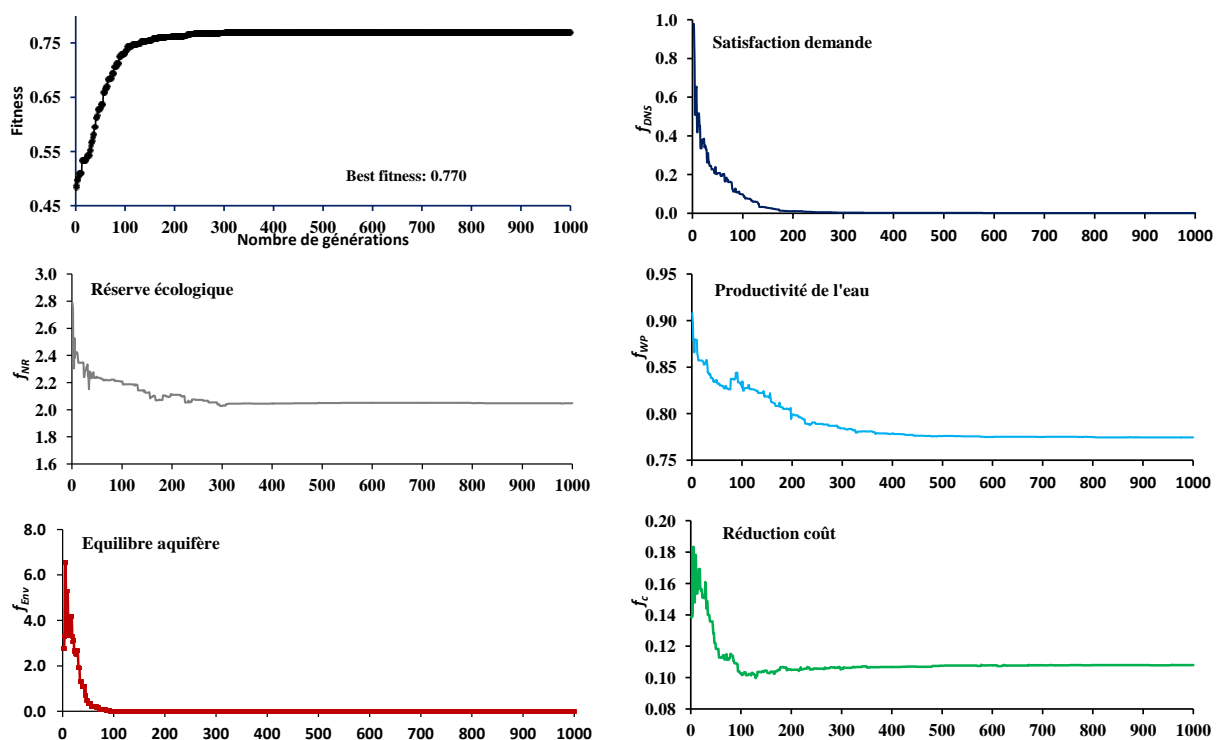


Figure 6.F.1 : Evolution de la fonction d'adaptation et des fonctions objectifs en fonction du nombre de générations dans le cas de l'optimisation avec la source souterraine.

Annexe 6.G.

Fournitures optimales à partir des sources à la satisfaction des demandes en eau

La répartition temporelle des fournitures d'eau correspondante à la valeur optimale de la fonction d'adaptation est représentée à la **Figure 6.G.1**. On peut observer que les demandes en eau exprimées sur l'horizon de gestion sont presque satisfaites pour des entrées déterministes. Les fournitures d'eau maximales sont compatibles aux fortes exigences en eau entre février et avril.

Le **Tableau 6.G.1** montre les erreurs relatives mensuelles " $ER = 100 * (F_{tot} - D) / D$ " (%) entre les demandes en eau (D) et les fournitures optimales totales (F_{tot}). La valeur minimale de ces erreurs de l'ordre de -6,1% est observée en mai 2013. Les écarts relatifs obtenus restent néanmoins dans une marge d'erreurs acceptables (USBR & USDA, 2001). Ainsi, l'outil de gestion pourrait être considéré comme efficient et robuste en termes de satisfaction de la demande en eau agricole.

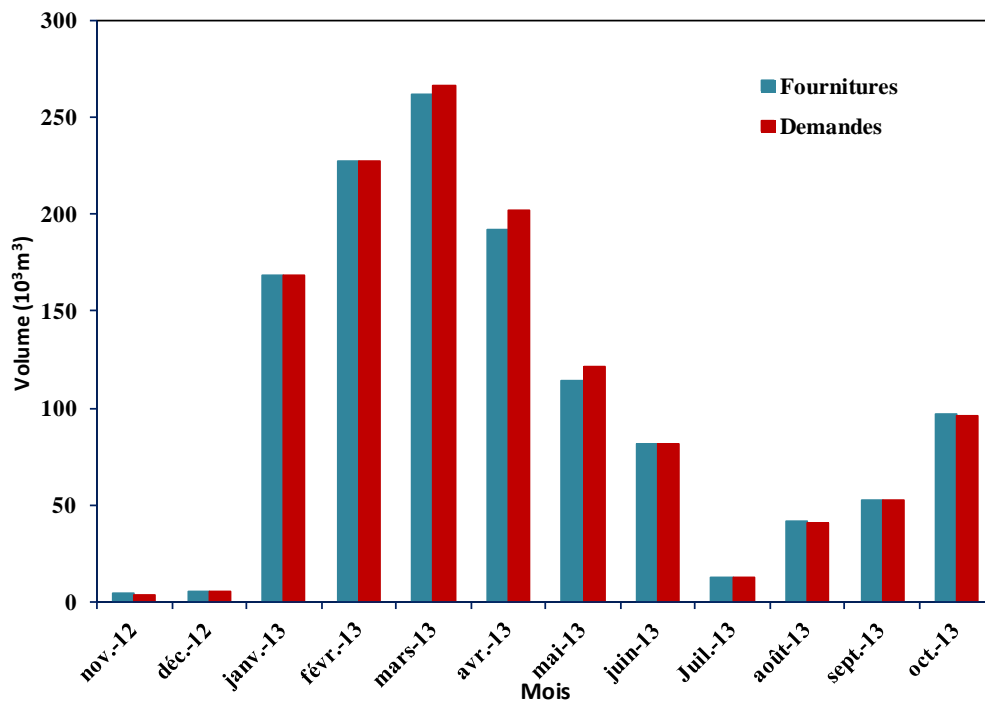


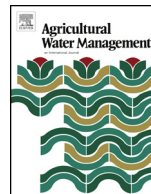
Figure 6.G.1 : Evolution mensuelle des fournitures d'eau optimales et des demandes en eau.

Tableau 6.G.1 : Ecarts relatifs mensuels entre les volumes des demandes en eau et des fournitures optimales totales des différentes sources.

Mois	nov.-12	déc.-12	janv.-13	févr.-13	mars-13	avr.-13	mai-13	juin-13	juil.-13	août-13	sept.-13	oct.-13
ER (%)	3,5	1,1	0,0	0,0	-1,7	-4,8	-6,1	0,0	0,6	1,6	0,8	1,2

PUBLICATIONS





Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso



T. Fowe^{a,*}, H. Karambiri^a, J.-E. Paturol^{a,b}, J.-C. Poussin^c, P. Cecchi^c

^a Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso

^b IRD-HydroSciences Montpellier, Université Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France

^c IRD-Gestion Eau, Acteurs et Usages, Case courrier, F-34095 Montpellier Cedex 5, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 May 2014

Accepted 7 January 2015

Keywords:

Hydrological monitoring

Small reservoirs

Water balance

Water use

Burkina Faso

ABSTRACT

Effective water resources development and management is crucial for sustainable economic growth and poverty reduction in many developing countries. In West Africa, large numbers of small reservoirs with volumes from 10^4 to 10^7 m³ play a considerable role in maintaining and developing activities in remote areas and in providing irrigation water for agriculture and supply water for both livestock and people. The lack of baseline data on reservoir operation hinders their optimal management. The objective of this study was to enhance the knowledge of water resources of the small reservoirs in order to improve their management in the context of multiple uses. This study was carried out on a small reservoir located in Southern Burkina Faso which was monitored for 2 years (from April 2012 to April 2014). A simple approach based on the mass conservation equation was developed for estimating reservoir fluxes. For a short hydrological monitoring period, the rainfall, evaporation and reservoir filling patterns revealed a different hydrological balance of the reservoir between these 2 years. A decrease of 32% in the annual rainfall leads to a 50% reduction in the annual runoff coefficient. The results showed that about 60% of water was lost by evaporation, whereas less than 20% of water caught in the reservoir was withdrawn for various uses. The available water resources in the studied system are largely sufficient to satisfy the current demands. There are still possibilities for developing uses of water storage and for enhancing the irrigation potential of the small reservoir. This analysis indicates that small reservoirs are underperforming. The results highlighted that estimating water fluxes in a reservoir is a central task to support water management authorities and stakeholders in operational strategies for water supply and irrigated agriculture.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In many sub-Saharan Africa countries, water resources are an important limiting constraint for economic growth and development. The West African landscape is today characterized by the presence of large numbers of small reservoirs. Most of the small reservoirs were built in the Sudano-Sahelian zone to overcome water shortage problems due to severe droughts of the 1970s and 1980s which had a dramatic effect on agriculture and livelihoods (Cecchi et al., 2009; Druyan, 2011; Venot and Krishnan, 2011). These hydraulic infrastructures have been identified as a promising option for water resources development in regions with few perennial rivers and where access to other water sources is difficult

(de Fraiture et al., 2014; Venot and Cecchi, 2011). There are more than 1700 small reservoirs scattered across Burkina Faso and Northern Ghana in the Volta basin (Cecchi et al., 2009; Venot and Cecchi, 2011).

Small reservoirs are always in high demand among local communities, because reservoirs improve food security by providing irrigation water for agriculture during the dry season, by providing water for livestock and by enabling fish production, small enterprises and other beneficial uses (Fromageot et al., 2006; Faulkner et al., 2008; Boelee et al., 2009; Cecchi et al., 2009). Their implementation in remote areas is often linked to local initiatives and reflects the desire of inhabitants to have a perennial water reserve in the vicinity of their residences. More recently, governments and donors in West Africa have been promoting small reservoirs to enhance irrigated cereal production downstream from the reservoirs (Venot and Krishnan, 2011). However, the irrigation potential of small reservoirs is underutilized, despite substantial investments

* Corresponding author. Tel.: +226 71 01 32 60.

E-mail addresses: tazen.fowe@2ie-edu.org, zentawef@yahoo.fr (T. Fowe).

in infrastructure (de Fraiture et al., 2014). Small reservoirs have been largely neglected in hydrological research. They receive less attention and lack management, while large reservoirs have traditionally been managed and monitored (Mustapha, 2009).

Generally located in headwater of large rivers, small reservoirs do not have enough information to assess and to understand their hydrological processes (Adwubi et al., 2009; Liebe et al., 2009; Rakhmatullaev, 2010). A fundamental challenge in agricultural water reservoir management lies in understanding the reservoir operation and improving management to satisfy water demands without compromising the system. Therefore, estimating the water balance and its components is a necessary precondition for this challenge. Many of water balance components (seepage, runoff and evaporation) are difficult to estimate directly even at the local scale, and are often assumed to be in the residuals of the water balance equation (Kampf and Burges, 2010).

Furthermore, the upstream catchments of these reservoirs are poorly gauged or ungauged. There are no measurement campaigns of the flow in small rivers since the investigation in West Africa at the end of the 1970s on representative catchments. The lack of information about inflows (surface runoff) into these reservoirs and the lack of knowledge of water dynamics in small reservoirs impedes efficient decision making for planning and optimal management (Liebe et al., 2005; Peel and Blöschl, 2011; Salami and Nnadi, 2012). In order to better manage, the knowledge on evolution of water storage within these reservoirs is required.

One way to increase knowledge is to analyze water levels recorded in the reservoir using methods that require a minimum of field measurements (Dubreuil, 1966; FAO, 1996).

This paper is focused on the hydrological operating of a small reservoir located on a tributary of the Black Volta River (Mouhoun) in Southern Burkina Faso. The general objective of the study is to enhance the knowledge of water resources of these small reservoirs in order to improve their management in the context of multiple uses. Specifically, the paper aims to identify and estimate the current water fluxes (inflows and outflows) with associated errors in order to establish the water balance of the small reservoirs in a data scarce environment. The study is conducted during a short monitoring period of 2 years, from April 2012 to April 2014.

2. Materials and methods

2.1. Site description

The study was conducted on the small reservoir of Boura (latitude 11.05° and longitude -2.49°), named the Boura reservoir located in Center-West Burkina Faso near the Ghanaian border. The Boura dam, built on the Kabarvar River (tributary of Black Volta River) in 1983, is the single perennial source of water in the Boura district that covers 1145 km². The reservoir was equipped with irrigation infrastructure in 1985. The main features of the Boura reservoir are shown in Table 1. At the local elevation of 100 m corresponding to full storage, the reservoir covers 200 ha, and the maximum depth from the dam crest is 6.25 m. ONBI (“Office National des Barrages et de l’Irrigation”), in 1982 (unpubl.), carried out a feasibility study of the Boura reservoir, and estimated its full supply capacity at 4.2 million cubic meters (MCM) and its dead storage at 0.34 MCM. Boura reservoir is replenished by direct rainfall and runoff inflows during the rainy season. Water of this reservoir is mainly used for irrigation, and also for livestock watering and for domestic uses. Moreover, the Boura reservoir is also used for fish breeding which is not a consumptive water use.

An irrigation scheme, named CORIKAB (“Coopérative des Riziculteurs Kama Nadié de Boura”), was developed in 1985 downstream of the dam, covering initially 40 ha and expanding afterward in

Table 1
Morphometric characteristics of the Boura dam and its contributing catchment.

Feature	Quantity
Full supply capacity [MCM]	4.2
Reservoir surface area [ha]	200
Length of dam wall [m]	750
Maximum height of dam wall [m]	6.25
Dam crest elevation [m]	101.25
Crest width [m]	3.5
Full supply level [m]	100
Spill length [m]	35
Minimum operational level [m]	97
Catchment area [km ²]	150
Maximum elevation [m]	349
Minimum elevation [m]	270
Global slope index [m km ⁻¹]	4
Specific elevation [m]	37.24

Source: Adapted from ONBI (1982, unpubl.).

1993 and 2006, up to 78 ha. It is irrigated by a gravity canal and is used for rice cultivation during the dry and rainy seasons. Another irrigation scheme, named PIAME (“Projet d’intensification agricole pour la maîtrise de l’eau”), was started by FAO in 2009 on the right bank of the Boura reservoir. It covers 20 ha and is irrigated by the semi-Californian system with 2 motor-pumps. The semi-Californian irrigation system is a water distribution technology composed by a motor pump, a primary supply canal, a PVC pipe distribution and drainage network. In this system, water is pumped directly from the reservoir or from the primary supply canal and pushed back at the head of the scheme, from where it flows by gravity to irrigate the plots.

In the PIAME scheme, water is devoted to irrigate vegetable cropping in dry season. Finally, individual or “informal” plots on the reservoir banks are irrigated manually with buckets or using small motor-pumps. They cover about 10 ha and water is mainly used to irrigate vegetable cropping in the early dry season when the reservoir level is still high.

The catchment area of about 150 km² is located in a region defined by the latitude range 10.94–11.07° and longitude range -2.50° to -2.37°, lying between the Center-West Region of Burkina Faso and the Upper West Region of Ghana (Fig. 1). The geology of the catchment is composed of pedestal rocks of Precambrian D (antebirimian) in the North and Precambrian of Dahomeyan in the South-East. The landscape is dominated by gently undulating plains with weak slopes. The vegetation of the catchment is part of the Sudanese savannah area with arboraceous and scrubby savannah vegetation.

The local climate condition is characterized by a single rainy season from May to October, with a peak rainfall measured in August, and a dry season from November to April. The basin receives an average annual rainfall of 920 mm but exhibits a strong inter-annual variability. The annual rainfall in Boura varies approximately from 572 mm to 1368 mm over the period from 1961 to 2010 (data provided by the meteorological service in Burkina Faso). The mean daily air temperatures throughout the year range from 21.5 °C to 34.3 °C, and annual potential evapotranspiration is approximately 1900 mm.

2.2. Hydrological monitoring devices

The hydrological variables such as rainfall, evaporation, and reservoir water level were measured with devices installed in March 2012 (Karambiri et al., 2012). Rainfall was monitored after each rain event while evaporation was measured twice each day (at 06:00 am and at 06:00 pm) using a rain gauge with a 400 cm² cone and an evaporation pan (Colorado pan adapted by ORSTOM) respectively. Water level was logged at intervals of 15 minutes

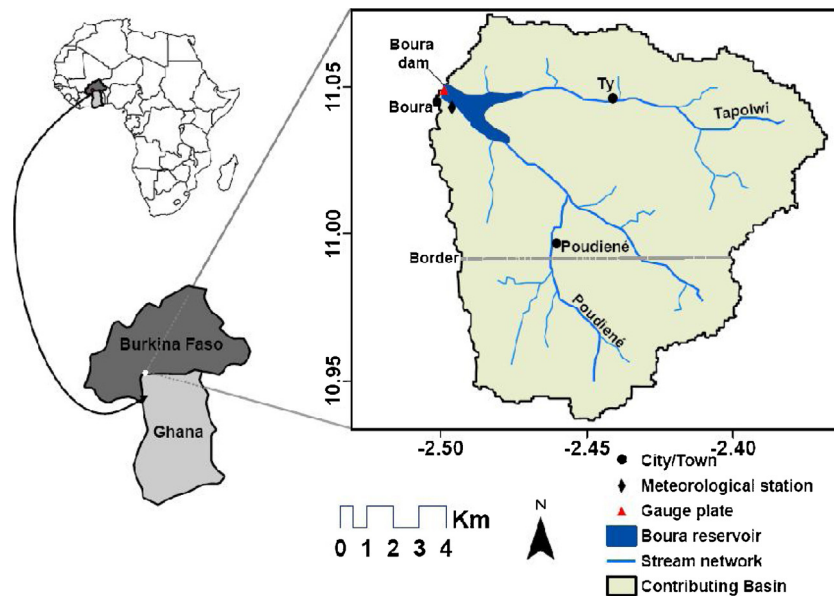


Fig. 1. Location of the Boura dam catchment with the hydrological monitoring system.

with an automatic water level recorder installed at the dam wall (Thalimedes, float-operated shaft encoder water level sensor, manufactured by OTT, Kempton, Germany) and a pressure transducer inserted into the reservoir and connected to a data logger (Solinst Levelogger, model 3001). The atmospheric pressure was compensated with baro logger data, installed not far from the reservoir. Water level in the reservoir was also recorded manually by a local observer using a set of staff gauges twice a day (at 06:00 am and at 06:00 pm). These three time series of recorded data from the Thalimedes, the pressure transducer and the staff gauges were used to produce a unique time series of daily reservoir water level which enables evaluation of the hydrological balance of the catchment and reservoir.

In the study area, the magnitude of waves is generally weak and the waves effect is not significant and is considered as negligible.

2.3. Estimation of the reservoir water balance components

The water balance was estimated on the basis of the principle of mass conservation, often referred to the storage equation, where the difference between the total inflow and outflow is balanced by the change in storage over a given time period (UNESCO, 2012). The water balance components considered here are shown in Fig. 2.

The general water balance for a single reservoir for a given time period may be expressed as given in the following equation:

$$\Delta V_s = V_r + V_{pcp} + V_{Gin} - V_{sp} - V_{evap} - V_{inf} - V_{wd} \quad (1)$$

where ΔV_s = change of water storage in the reservoir [m^3] at time-step t ; V_r = runoff into the reservoir [m^3]; V_{Gin} = groundwater inflow from aquifer to reservoir [m^3]; V_{sp} = spills out of the reservoir [m^3]; V_{wd} = water withdrawal (irrigation, livestock, household use) [m^3]; V_{pcp} and V_{evap} = rainfall onto and evaporation from the reservoir surface area [m^3]; and V_{inf} = infiltration loss from the reservoir [m^3].

2.3.1. Rainfall

During the rainy season, the reservoir receives water on its open water surface area. To evaluate the volume of rainfall, the daily water surface area of the reservoir was derived from topographic maps of the reservoir. Regional water surface area-volume equations have been developed for various regions in Africa (Liebe et al.,

2005; Cecchi et al., 2009). However, these relationships are valid only for reservoirs with surface areas less than 100 ha (Annor et al., 2009). The volume of precipitation falling directly in the reservoir is expressed by the following equation:

$$V_{pcp} = 10 \times A_r \times P \quad (2)$$

where P = daily rainfall [mm], and A_r = daily average reservoir water surface area [ha]. The factor 10 comes by the fact that $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

2.3.2. Evaporation losses

Many methods have been proposed to estimate evaporation from free-water surfaces (Allen et al., 1998; Rosenberry et al., 2007; Tanny et al., 2008). The method choice depends on data availability. For this study, pan data were used to estimate evaporation rates (Ikebuchi et al., 1988; Abtew, 2001). However, there are some difficulties associated with adjusting pan evaporation to reflect evaporation from a reservoir (Guobin et al., 2004; Lowe et al., 2009).

The volume of water lost by evaporation from a reservoir on a given day was computed as a product of the evaporation rate with the average reservoir surface area during the day. This is expressed in the following equations:

$$V_{evap} = 10 \times A_r \times E_{RET} \quad (3a)$$

$$E_{RET} = K_{PAN} \times E_{PAN} \quad (3b)$$

where K_{PAN} = annual pan coefficient for converting pan evaporation (E_{PAN}) to reservoir evaporation (E_{RET}); E_{RET} = daily reservoir evaporation [mm] is determined by Eq. (3b); and E_{PAN} = daily evaporation pan [mm]. The factor 10 comes by the fact that $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Some authors (Pouyaud, 1990; Brunel and Bouron, 1992) have tried to establish relationships between pan evaporation and reservoir evaporation. They found that, over 33 lakes in West and Central Africa, the ratio of lake evaporation to pan evaporation ranged between 0.63 and 1. Furthermore, in the South-West of Burkina Faso, especially in the towns of Dieboungou and Gaoua which are in the same climatic zone as Boura, the annual pan coefficient was estimated to be 0.8 (Brunel and Bouron, 1992). Therefore, this study assumes that the annual pan coefficient is approximately 0.8.

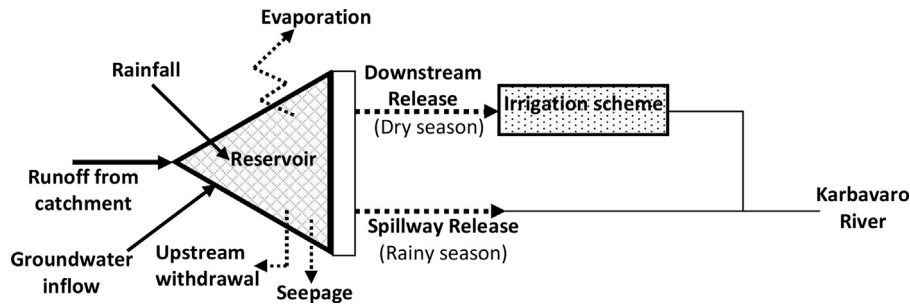


Fig. 2. Schematic diagram of Boura reservoir with different water balance components.

2.3.3. Groundwater inflow and infiltration

Groundwater inflow to the reservoir was not taken into account due to the lack of piezometer networks around the reservoir banks, and the catchment is drained by intermittent streams with no base flow. The infiltration (groundwater outflow from reservoir to aquifer) flow rates were estimated using the change in reservoir storage and evaporation during the periods without inflows (rainfall and runoff), and with minimal water use (Sukhija et al., 1997; Kingumbi et al., 2002; Mugabe et al., 2003; Lacombe, 2007). Thus, the volume of water infiltrated is given by the following equation:

$$V_{\text{inf}}^t = V_s^t - V_s^{t+1} - V_{\text{evap}}^t \quad (4)$$

2.3.4. Spillway discharge

In general, during the rainy season, the Boura reservoir becomes full and starts overflowing from a rectangular spillway. The spillway flow rate was estimated using Bazin's formula expressed by the following equation:

$$Q_{\text{sp}} = \mu \times L \times (2g)^{1/2} \times h^3 \quad (5)$$

where Q_{sp} = spillway discharge [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]; h = head on the spillway [m]; μ = average discharge coefficient taken as $0.4 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$; L = crest length of the spillway [m]; and g = acceleration due to gravity [9.81 m s^{-2}].

The spillway head was obtained by the difference in the reservoir water levels recorded each 15 min and the spillway level. The volume of water spilled was computed each 15 min and summed by day.

2.3.5. Water withdrawals

Water withdrawals were determined by survey. The Boura reservoir provides water for irrigation, livestock, and humans. Even though there are no data that show clearly the amount of water withdrawn from the reservoir, this component was estimated through field investigation (using onsite field observations and secondary data). Water withdrawals were also estimated as residual of the storage equation over the dry period.

2.3.5.1. Agricultural water estimation. The net volume of crop water requirement (CWR) was estimated by using the reference evapotranspiration (ET_0) obtained from pan evaporation data and the crop coefficients (k_c) obtained from FAO guidelines for crop water requirements (Doorenbos and Pruitt, 1977), according to the following equation:

$$\text{CWR}_i = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{\text{NGS}} 10 \times (ET_{0t} \times k_{c,i}^j \times A_i) \quad (6)$$

where NGS = number of the growth stages (there are 4 stages); A_i = surface area of crop i [ha]; j = stage index; and T = growth period [day].

The main crops cultivated around Boura reservoir during the dry season are tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.), rice (*Oryza glaberrima-sativa* L.: FKR 56N) and maize (*Zea mays* L.). During the growing season, cropped areas were estimated with ArcGIS 10 using GPS survey and physical measurements. In the rainy season, half of the CORIKAB scheme area remains flooded and uncultivable because of drainage constraints in lowland plots near the river. Rainfed rice is cultivated in the remaining area. In the rainy season, the valve is opened when spell droughts are observed. Therefore, the amounts of water release in this period could be neglected compared to the continuous water release in dry season.

2.3.5.2. Water for livestock estimation. The livestock in the region includes cattle, goat, sheep, donkeys and pigs. The total livestock data for the whole district of Boura was collected from the final report of "Plan Communal de Développement" in Boura (PCD, 2007). Livestock that uses the water of Boura reservoir was estimated to be 25% of the total district livestock. To estimate livestock water consumption, all the livestock types were converted to the equivalent tropical livestock unit (TLU), and the livestock water requirement was $351 \text{ day}^{-1} \text{ TLU}^{-1}$.

2.3.5.3. Domestic uses. Certain primary household needs are satisfied by water from the reservoir, such as cleaning, bathing, dishing, and washing. Some people collect water in one or two 200l barrels, pulled on a chariot by a donkey. The water quality is not good and water supplying for households is generally done in wells or boreholes. The contribution of domestic water withdrawal to the total water consumption is negligible compared to the total water withdrawn.

2.3.6. Runoff

Based on field observations, continuous stream flow takes place between July and October. Assuming there is no water withdrawal during this wet period, runoff into reservoir was computed using Eq. (7a). Cumulative runoff was used to estimate the annual runoff coefficient (Oblinger et al., 2010; Ufoegbune et al., 2011) with the following equations:

$$V_r^t = V_s^{t+1} - V_s^t + V_{\text{sp}}^t + V_{\text{inf}}^t - V_{\text{pcp}}^t \quad (7a)$$

$$V_r^c = 1000 \times K_o \times P^c \times A_{\text{BV}} \quad (7b)$$

where A_{BV} = surface area of catchment [km^2]; K_o = annual runoff coefficient [%]; P^c = cumulative rainfall over the period of interest [mm]; V_r^c = cumulative runoff over the period of interest [m^3].

2.4. Uncertainties in estimating the water balance components of the Boura reservoir

Various approximations and errors resulted from uncertainty when estimating the water balance components. Measurements of water balance components require a variety of techniques, each

Table 2
Uncertainties for some components of water balance coming from previous studies.

Variable	Error source	Estimated maximum absolute errors (%)	Source of data
Rainfall	Instrument	[5; 15]	Winter (1981)
	Placement of gauge	[1; 5]	Winter (1981)
	Observer	Difficult to characterize	Dingman (1994)
Evaporation	–	5	Sacks et al. (1998)
	Methodology (energy budget)	<10	Winter (1981)
	Pan coefficients	[10; 15]	Dingman (1994)
	Regional pan evaporation and pan coefficients	20	Sacks et al. (1998)
	Regional pan evaporation and pan coefficients	20	Motz et al. (2001)
Water level	pan evaporation and pan coefficients	<40	Lowe et al. (2009)
	Frequency of readings	5	Herschey (1973)
	Regression equations	5	Motz et al. (2001)

one associated with uncertainties (Table 2). The errors on the estimation of the volume of rainfall and evaporation could also come from the uncertainties on the reservoir surface areas.

For this study, the error associated in measuring annual rainfall was chosen as 10%; the error in annual evaporation was assumed to be 15%; and 10% was taken as the error related to the discharges. For the water year, the absolute error estimate on the change in reservoir water level (δH_s) is expressed in the following equation:

$$\delta H_s = \sqrt{2} \times \delta WL \quad (8)$$

where δWL = absolute error on the daily water level variation [m].

The remaining components were calculated as residual terms in the water balance equation and thus each of them contained an uncertainty that reflected the uncertainties in the other water balance components of Eqs. (4) and (7a). Based on Lee and Swancar (1997), the absolute error of each of these components was computed using the following equation:

$$\delta(X) = \left[\sum_i \delta^2(Y_i) \right]^{1/2} \quad (9)$$

where $\delta(X)$ = absolute error associated to the residual component X [m^3]; and $\delta(Y_i)$ = absolute error related to each of the water balance terms Y_i [m^3] which was used to obtain X .

The relative error (RE) in percentage associated to the residual component X is expressed as given in the following equation:

$$RE [\%] = \pm 100 \times \frac{\delta(X)}{X} \quad (10)$$

3. Results

3.1. Variation of the reservoir water level

The water level fluctuations for the Boura reservoir are shown in Fig. 3. In both years (1st April 2012–1st April 2013 and 1st April 2013–1st April 2014), the minimum reservoir levels were observed at the end of June, and a strong variation of the water levels was observed at the beginning of July.

The minimum water volumes observed at the end of the dry seasons 2012/2013 and 2013/2014 were 0.94 and 0.65 MCM, respectively, while the maximum water volumes were 4.2 and 3.53 MCM. Approximately 0.60 and 0.31 MCM of water remained above the minimum operational level corresponding to the dead storage (0.34 MCM) at the lowest reservoir levels respectively in 2012/2013 and 2013/2014. Unlike the 2012/2013 season, where

the water level exceeded the spillway level, it did not reach this level during the 2013/2014 season. The maximum daily change in reservoir level reached 42 cm in both seasons, while the maximum monthly variation observed in July could be justified by the beginning of intermittent streams flowing and strong rainfall events.

The reservoir might have not filled completely in 2013/2014 because its level was low at the beginning of the rainy season and rainfall was not sufficient. This situation also occurred in 2005 with a low cumulative rainfall observed (less than 700 mm). Moreover, successive low rainfall did not cause a sudden filling. Thus, reservoir filling is very dependent on distribution and amount of rainfall. A 2nd order polynomial decay of the water levels was observed from the end of rainy season until the beginning of next season flows (Oct-12 to Jul-13). The reservoir has been operated without drawing down below the minimum operational level.

3.2. Rainfall and evaporation analysis

3.2.1. Rainfall characteristics

During the 2012 and 2013 rainy seasons, total rainfall was 1130 and 770 mm, respectively. Compared to the period 1981–2010 in Boura and Pô synoptic station at 150 km far from Boura and located in the same agro-ecological region with an average annual rainfall of 895 and 981 mm respectively, 2012/2013 was considered as a wet year, while 2013/2014 as a dry one. These cumulative rainfall amounts represented 1.64 and 1.03 MCM water falling into the Boura reservoir. A total number of 67 and 81 rainy days with maximum daily rainfalls of 67 and 53 mm were observed in 2012/2013 and 2013/2014, respectively. The highest daily rainfall amount occurred in July in both years, while the highest monthly rainfall amount occurred in August 2012 and July 2013 (Figs. 3 and 4). Cumulative rainfall amount from July to September corresponded to more than 70% of annual rainfall amount.

Monthly rainfall was not strongly related to the number of rainy events. More than 50% of annual rainfall corresponds to 19 and 15 rainy days with rainfall greater than 20 mm in 2012/2013 and 2013/2014, respectively (Table 3). In 2013/2014, 60% of daily rainfall events were less than 5 mm, corresponding to very low rainfall according to the rainfall classes established by Ibrahim et al. (2012). The low rainfalls observed in 2013/2014 were not likely to generate runoff on the catchment area. The moderate (10–20 mm day⁻¹), strong (20–50 mm day⁻¹) and very strong (>50 mm day⁻¹) rainfalls mostly observed in 2012/2013 (Table 3) were significant for runoff generation.

3.2.2. Evaporation losses

The average daily evaporation rates recorded in evaporation pan ranged from 4.1 to 9.4 mm month⁻¹. In 2012/2013 and 2013/2014, total evaporation pan was 2240 and 2630 mm, respectively. Evaporative losses from the Boura reservoir ranged from 3.6 to 9.9 mm day⁻¹ in the dry seasons and between 1 and 7 mm day⁻¹ in the rainy seasons (Fig. 3). These daily evaporation rates are near those ranging from 2 to 10 mm day⁻¹ proposed by Nicola (2005) in the Volta basin in West Africa. Taking into account the reservoir surface area, the average amount of water losses by evaporation was 2.77 MCM each year. The volumetric loss rate ranged between 3425 and 9743 m³ day⁻¹ depending on the month of the year.

The total evaporation losses from the reservoir of 1802 and 2105 mm in 2012/2013 and 2013/2014, respectively, are comparable to the average yearly evaporation of 1881 mm for a ten year period from 1986 until 1995 obtained by Liebe (2002) in the Upper East Region of Ghana. The evaporative losses in Boura are similar to the average annual pan evaporation (2240 mm year⁻¹) observed at the Pô synoptic station over the period 1982–2002.

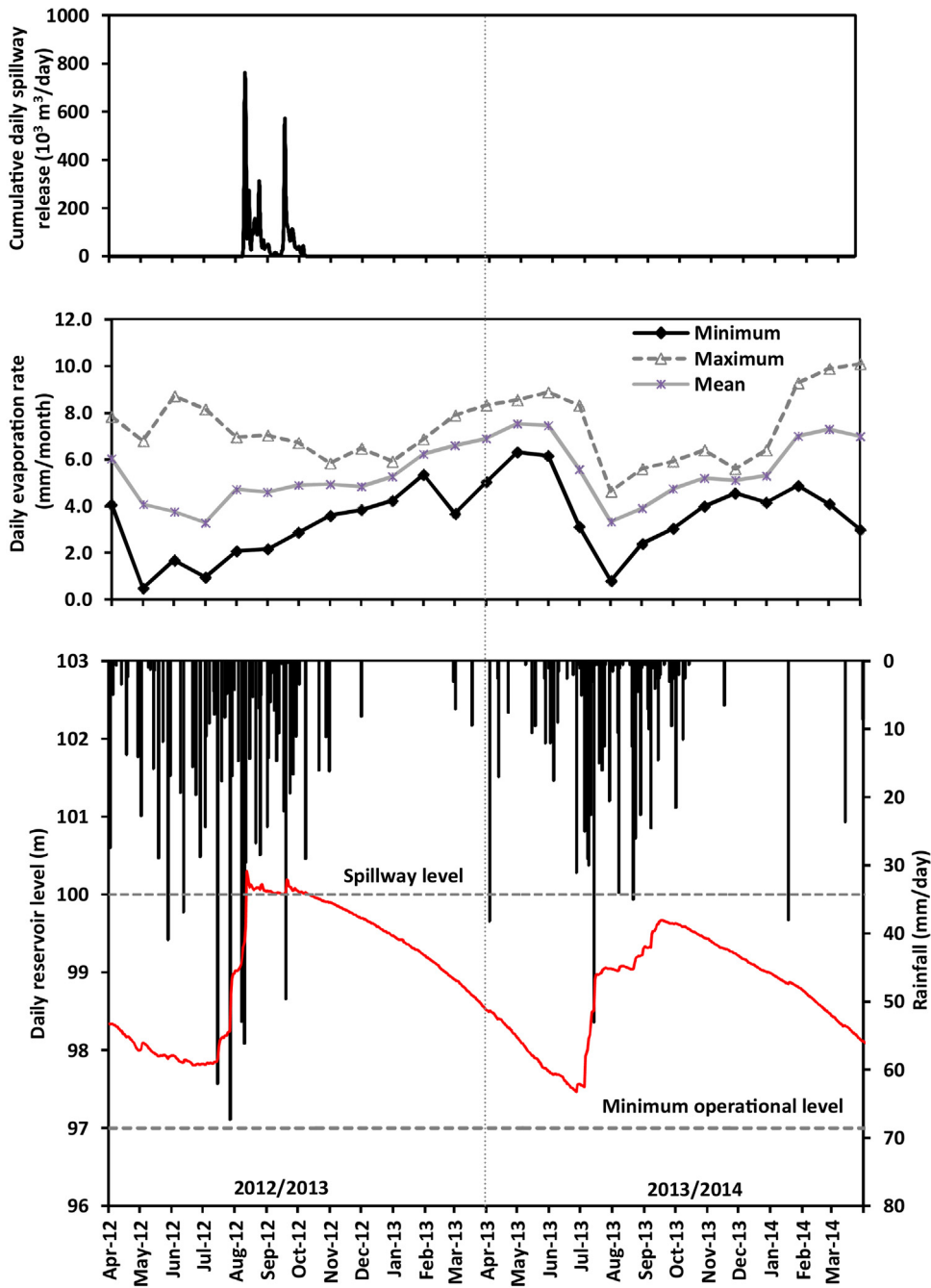


Fig. 3. Daily water level, rainfall, evaporation and amount of water spilled during the 2 year monitoring period (2012/2013 and 2013/2014 year).

Table 3
Distribution of daily rainfall for the 2012/2013 and 2013/2014 year.

Daily rainfall volume (A, mm)	Number of days with $P_j > A$	Cumulative rainfall height $>A$ [mm]	Percentage to annual cumulative rainfall [%]	Number of days with $P_j > A$	Cumulative rainfall height $>A$ [mm]	Percentage to annual cumulative rainfall [%]	Average number of days with $P_j > A$	Average cumulative rainfall height $>A$ [mm]	Percentage to interannual cumulative rainfall [%]
50	4	238	21	1	53	7	3	173	18
40	6	329	29	1	53	7	5	290	30
30	7	366	32	6	188	26	10	439	45
20	19	683	60	15	428	55	17	625	64
10	41	1014	90	26	589	77	32	843	86
5	51	1089	96	35	663	86	42	923	94
0	67	1130	100	81	770	100	77	981	100

P_j : Observed daily rainfall; A: Threshold value.

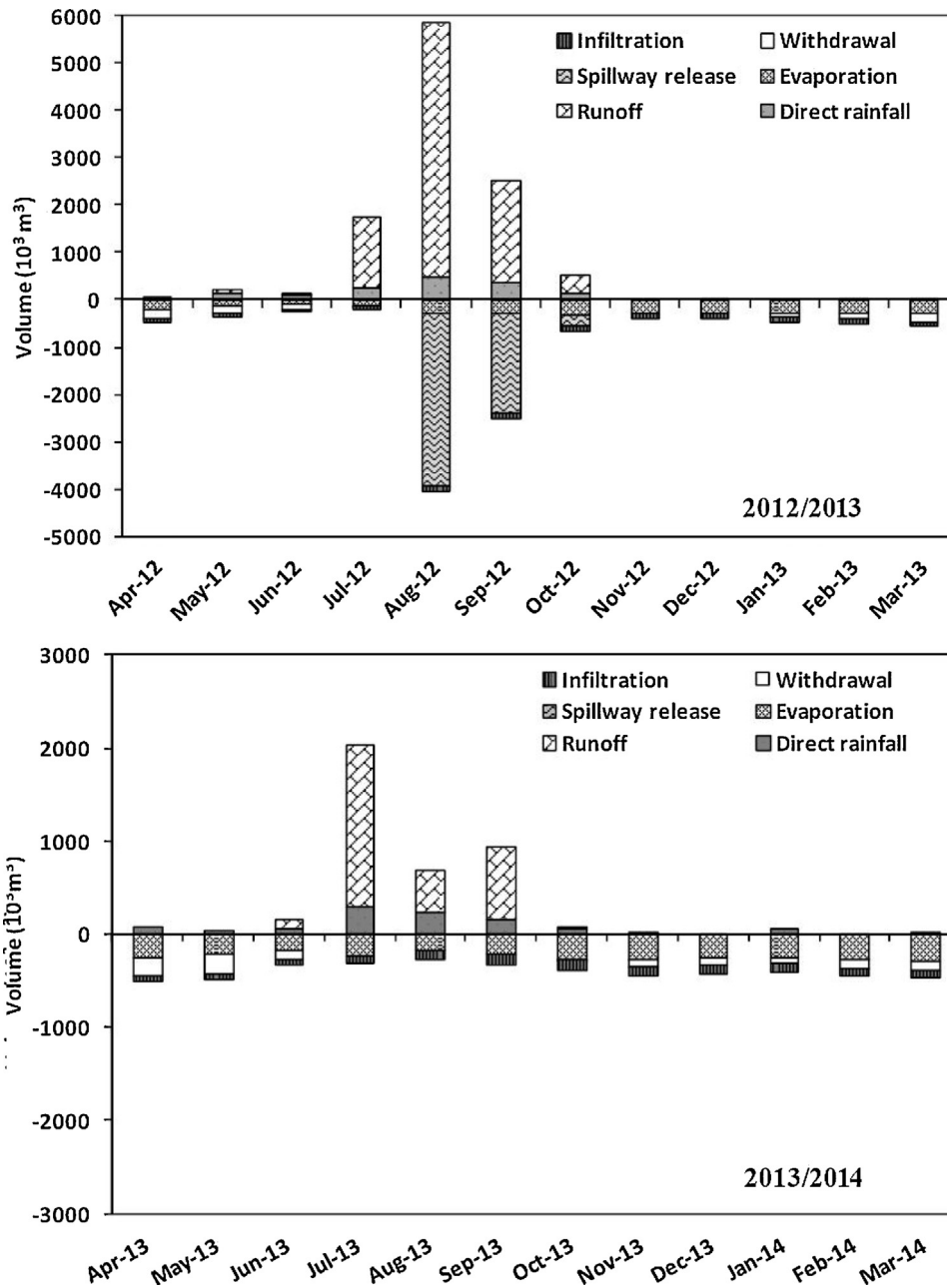


Fig. 4. Water balance of Boura reservoir in monthly time step (2012/2013 and 2013/2014 year): inflows (positive part) and outflows (negative part).

3.3. Overflow spillway

During the monitoring period, the reservoir spilled almost two months in 2012, from August 12th to October 10th (Fig. 3). The maximum head of overflow spillway of 32 cm corresponds to 43% of the higher overflow height that the dam could support during exceptional floods. More than 60% of the total amount of water volume spilled was observed in August 2012 (3.70 MCM). A continuous decrease of the monthly water volume spilled corroborates with the decrease of the monthly rainfall amounts (Fig. 4). In the 2012 rainy season, the amount of water spilled was estimated to be 6.24 MCM, which represents 64% of the total inflow. Comparing this value to the reservoir storage capacity, complete renewal of water in the reservoir is possible (ratio ≈ 1.5). In contrast, no spill was observed in 2013 rainy season. Thus, there was no complete

renewal of water in the reservoir in 2013/2014. This might affect water quality of reservoir and might have a link with macrophytes (*Ceratophyllum submersum* L.) proliferation that was observed during that period.

3.4. Water loss by seepage

The construction of small reservoirs is a widespread strategy for dealing with water scarcity by capturing runoff and improving the artificial groundwater recharge. Infiltration (or seepage) was sometimes not considered in the reservoir water balance (Piper et al., 1986; Güntner et al., 2004). The infiltration rate from the reservoir ranged from 0.1 to 4.9 mm day⁻¹ with an average of 2.1 mm day⁻¹ was estimated between November and December. These values were similar to those (2 and 5 mm day⁻¹) proposed

Table 4
Cropped areas and water requirement during dry seasons in Boura.

Crops	Growth period	2012/2013 season [ha]	2013/2014 season [ha]	Crops water requirements [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$]
Rice	15 February–15 June	68.7	49.3	8600
Maize	15 February–15 June	7.4	3.4	4920
Vegetable	15 November–15 March	7.2	17.5	5325

Table 5
Livestock types and associated tropical livestock units (TLU).

Species	TLU per livestock type	2007		2013	
		livestock number	Total TLU	livestock number	Total TLU
Cattle	0.7	12126	8488	13980	9786
Sheep	0.1	5612	561	6470	647
Goats	0.1	9963	996	11486	1149
Donkeys	0.4	1383	553	1594	637
Pigs	0.2	1406	281	1621	324
Total	–	–	10,880	–	12,543

Source: adapted from PCD (2007), projection 2013, growth rate 2.4% per year (FAO, 2005).

by Sander (2010) for the small reservoirs around Leo city near the Boura district. The seepage rate could be time variable, diminishing during the life of a reservoir. However, by assuming a constant infiltration rate of 2.1 mm day^{-1} from the reservoir, the total amount of infiltrated water over the periods 2012/2013 and 2013/2014 was about 1.16 and 1.06 MCM, respectively.

3.5. Water withdrawals

During dry seasons the downstream irrigated scheme was predominantly planted with rice (90% of the area). The irrigation season starts in November and ends in June. The different crops and the crop water requirements were estimated for the cultivated area. The irrigated area with vegetables on the banks of the reservoir increased more than 110% between 2012/2013 and 2013/2014 dry seasons but remained lower than the area irrigated by canals downstream of the dam (Table 4). This increase is justified because most of the farmers (individually or collectively) purchased small motorized pumps to draw water directly from the reservoir to irrigate their vegetables. The decrease of rice cultivated area in 2013/2014 is due to the fear of water shortages that might occur toward the end of the dry season.

The total amount of water required for irrigation was estimated to be 0.66 MCM. Table 5 shows the total number of livestock between 2007 and 2013. The maximum amount of water withdrawal due to watering of herds was estimated around $20,000 \text{ m}^3$ per dry season. Livestock drinking water constitutes less than 3% of the total of water demand and therefore could be neglected.

The average amount of water withdrawn in both seasons was estimated to be 0.90 MCM by applying the water balance method. Comparing this value (0.90 MCM) to the water demand (0.66 MCM), an efficiency of 73% is estimated for the irrigation system. The efficiency is rather good but can be improved by a better irrigation water management.

3.6. Catchment runoff

The contribution of the catchment to the reservoir storage volume comes from the runoff upstream of the reservoir (2 intermittent rivers) and the runoff of the reservoir banks.

The runoff upstream of Boura reservoir varies during the year with no inflow from November to June. In both the 2012 and 2013 rainy seasons, the first inflow into the reservoir occurred in the

middle of July. The analysis of monthly runoff showed that the peak flows reached in both rainy seasons were 36.3 and 11.6 mm, respectively, in August 2012 and July 2013 (Fig. 4). The cumulative catchment runoff during 2012/2013 and 2013/2014 rainy seasons were 65.1 and 20.5 mm in terms of height, respectively, which is equivalent to 9.70 and 3.10 MCM in terms of volume. Compared to 2012/2013, the total inflow volume in 2013/2014 was 68% lower, with relative variations of rainfall and evaporation -32% and $+17\%$, respectively. As a result, the dam retained about 36% and 100% of the annual surface runoff in the 2012 and 2013 rainy seasons, respectively. Therefore, the weakness of the annual runoff coefficient (6% in 2012/2013, and 3% in 2013/2014) could be justified by the predominance of sandy soils and the vegetation cover over the drainage basin and its slight slopes. These results are in accordance with Milville (1991) who found an average runoff coefficient of 7% in a small watershed at 75 km East of Ouagadougou in Burkina Faso.

3.7. Summary of water balance and uncertainty

On the annual basis, the water balance in the small reservoir for both monitoring years is summarized in Table 6. The positive change in storage between the beginning and the end of the 2012/2013 period reflected the level of the anthropogenic pressure on the reservoir water, while the negative change in 2013/2014 was mostly due to the low inflows into the reservoir.

The estimated relative errors for infiltration, runoff, and water withdrawal from Eq. (10) were $\pm 35\%$, $\pm 10\%$, and $\pm 40\%$, respectively. In both years, the average annual surface runoff represented about

Table 6
Summary of the water balance components [10^6 m^3] for the two year monitoring period.

Water budget components	2012/2013	2013/2014
Surface runoff	9.70	3.10
Direct rainfall	1.64	1.03
Annual total inflow	11.34	4.13
Evaporation losses	2.76	2.78
Overflow spillway	6.24	0.00
Infiltration losses	1.16	1.06
Water withdrawals	0.84	0.95
Annual total outflow	11.02	4.78
Initial reservoir storage	1.46	1.69
Reservoir storage at the end of period	1.69	1.23
Annual change in water storage	0.23	-0.46

83% of the total inflow into Boura reservoir, and overflow spillway and evaporation represented, respectively, about 40% and 35% of the total outflow, while water withdrawal represented 11% of the total outflow.

The water balance of Boura reservoir for the 2 years is characterized as follows. The average annual rainfall over the reservoir was 950 mm, and the average runoff from the catchment was 43 mm. By taking into account the volume–elevation curve this corresponds to a water level rise of 3200 mm. The average annual evaporation from the water surface was 1950 mm, and the average annual overflow from the reservoir through the spillway was 1560 mm when converted to the reservoir surface area. Water level decrease due to withdrawals for various demands was estimated to be approximately 450 mm. Due to errors of measurement or estimation of the water balance components, discrepancy term should be taken into account to completing the water balance.

4. Discussion

The retention of water in reservoirs is an important tool to extent availability over time in a water scarce region. Reservoirs capture surface runoff during the rainy seasons from intermittent rivers. A reduction in major rainfall events contributes to larger periods without runoff. The first rains at the beginning of the rainy season produce very little runoff from the reservoir banks, the soil being dried out after the extended dry season.

An understanding of the magnitude of the dynamics of reservoir water balance is important for any sustainable development. The reservoir water levels are strongly influenced by the rainfall characteristics that control the surface runoff from the catchment. Therefore, the reservoir does not systematically fill all the year. It may experience large sudden rises of water level as a result of strong floods generally observed in July and August, but the subsequent downward recession is slow, being limited by the difference between rainfall and evaporation and by the level anthropogenic pressure on water resources. This typical annual dynamic decreases the storage until its minimum in June.

The volume of rainfall falling into the reservoir as well as the volume of water evaporated and infiltrated depends on the reservoir surface area. Thus, the uncertainties associated with estimating the reservoir surface area could contribute to overestimation or underestimation these components.

Rainfall onto the water surface was small compared to surface runoff inflow, and was about 30–60% of the evaporation from the reservoir. Evaporation losses make shallow reservoirs less efficient than large reservoirs. Evaporation was identified as a major factor in reducing water storage especially in arid and semi-arid regions (Liebe, 2002). In these areas, annual evapotranspiration is generally greater than rainfall, determining drought conditions that make irrigation necessary for agriculture. This translates into a necessity for water storage reservoirs to ensure availability of water for various uses in the dry season.

The water balance in both years showed that less than 20% of available water was withdrawn for various uses, and about 60% was evaporated. Small reservoirs are more evaporation pans than the water stocks intended for uses. The rice farmers downstream of the Boura dam are by far the most numerous and they withdraw the most water, irrigating 60 ha, as compared to the 12 ha for vegetable in the informal area upstream of the dam (Table 4). Irrigation consumes the bulk of reservoir water use.

Small reservoirs play an important role for the sustainability of groundwater. The average groundwater recharge rate from the reservoir is about $3.8 \text{ mm year}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (areally averaged). Thus, less than 30% of the retained water in the reservoir was estimated to be lost as seepage out of the reservoir. On the one hand, this water lost

from the reservoir could be beneficial for the downstream river and on the other hand, groundwater recharge can also be considered as a main asset related from water stored in small reservoirs (several wells and ponds downstream of dam).

In the same way as seepage, the water overflow from the reservoir, while lost from the reservoir, is not wasted. The spillway overflow allows the water transfer from upstream to downstream when the dam is full. This water spilled can protect the ecological system and can maintain the ecological conditions downstream of the dam.

The results also showed that the water level in small reservoirs can be used to better understand the hydrology of the contributing catchment upstream of a dam. For a short hydrological period (2 years), the hydrological balance varied substantially. In terms of inter-annual hydrological variability, there was a decrease of total rainfall by 32% in 2013 as compared to 2012, and a 17% increase in evaporation caused a decrease in surface runoff by 68%. These results are similar to those obtained by Séguis et al. (2011) in the Donga basin in West Africa.

Boura reservoir spilled almost two months in 2012 and no spill was observed in 2013. In 2012, a complete renewal of water in the reservoir was observed, while in 2013 there was no complete water renewal. The huge but recent proliferation of macrophytes within the Boura reservoir could be partially explained by the lack of water aeration.

5. Conclusions

Small reservoirs promote the diversification of agricultural activities at the local scale. The increasing demands for surface water supplies for agriculture have emphasized the need for more information on small reservoirs. The water storages provided by these hydraulic infrastructures depends upon the interrelationship between inflows, outflows, and their respective distribution throughout the year. This paper focused on the determination of the water balance components of the small reservoir and its hydrological operation, with the aim of better controlling the water available.

It was noticed that minimum information should be extracted from the time series of water levels for the water balance estimation. For this reason, it is essential to complement this measurement with a rain gauge and an evaporation pan close to the reservoir.

The water balance in both years showed that less than 20% of the available water was withdrawn for various uses (low demand for water resources), and about 60% was evaporated. The general trend in volume of water utilized was that irrigation consumes the bulk of the water followed by livestock and finally domestic uses. It was observed that, currently the Boura reservoir is under-utilized as it has adequate water to meet all of its demands and still has excess water, allowing a possible expansion in irrigation if the same crops are grown under the current farming practices or allowing the development of other water uses.

A large fraction of water remained above the minimum reservoir operational level at the end of the dry period. This volume of water plays a vital role in sustaining the fisheries activities until the next rainy season, provides a suitable habitat for flora and fauna.

The results obtained for the estimation of the reservoir volume can be also used as inputs in water allocation and water resources planning models like WEAP (Water Evaluation and Planning System) for reservoir water management.

The approach adopted in this study was determined by the availability of field data. It is expected to provide reasonably good results for the operation of small reservoirs. However, one important disadvantage is that all the components of the water balance were not independently estimated. Nevertheless, this approach will enable

a comprehensive understanding of the functioning of a small reservoir, and should help the local community and stakeholders make informed decisions on their activities. The monitoring of water storage in small reservoirs can also contribute to the on-going hydrological research on prediction in ungauged basins, especially in parts of the world where the value of water is high and hydrological observations scarce.

Acknowledgments

This research was carried out through the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Challenge Program on Water and Food (CPWF), which is funded by the UK Department for International Development (DFID), the European Commission (EC), the International Fund for Agricultural Development (IFAD), and the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC). This work is a contribution to the project VL3: "Integrated Management of Small Reservoirs for multiple uses in the Volta Basin", led by the "Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement" (CIRAD, Montpellier, France). We would like to thank the people of Boura for their assistance and participation in the research.

References

- Abtew, W., 2001. Evaporation estimation for lake Okeechobee in South Florida. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127 (3), 140–147.
- Adwubi, A., Amegashie, B.K., Agyare, W.A., Tamene, L., Odai, N.S., Quansah, C., Vlek, P., 2009. Assessing sediment inputs to small reservoirs in Upper East Region, Ghana. *Lakes Reservoirs Res. Manage.* 14, 279–287, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1770.2009.00410.x>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. In: *Irrigation and Drainage, Paper 56*. FAO-ONU, Rome, Italy.
- Annor, F.O., van de Giesen, N., Liebe, J., van der Zaag, P., Tilmant, A., Odai, S.N., 2009. Delineation of small reservoirs using radar imagery in a semi-arid environment: a case study in the upper east region of Ghana. *Phys. Chem. Earth* 34 (4–5), 309–315, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2008.08.005>.
- Boelee, E., Cecchi, P., Koné, A., 2009. Health impacts of small reservoirs in Burkina Faso. In: *IWMI Working Paper, 136*. IWMI, Colombo, Sri Lanka.
- Brunel, J.P., Bouron, B., 1992. Evaporation et nappes d'eau libre en Afrique sahélienne et tropicale. *CIHE-ORSTOM*.
- Cecchi, P., Gourdin, F., Koné, S., Corbin, D., Etienne, J., Casenave, A., 2009. *Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire: inventaire et potentialités hydrologiques*. *Sécheresse* 20 (1), 112–122.
- de Fraiture, C., Ndanga, K.G., Sally, H., Kabre, P., 2014. *Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso*. *Agric. Water Manage.* 131, 212–220, [doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.001).
- Dingman, S.L., 1994. *Physical Hydrology*, vol. xiv. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. In: *Irrigation and Drainage, Paper 24*. FAO-ONU, Rome, Italy.
- Druyan, L.M., 2011. Studies of the 21st century precipitation trends over West Africa. *Int. J. Climatol.* 31 (10), 1415–1424, <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2180>.
- Dubreuil, P., 1966. Hydrology of lakes and reservoirs. *International hydrological decade*. In: *Symposium of Garda, IAHS Publ.*, pp. 114–121, 70.
- FAO, 1996. *Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale*. In: *Irrigation and Drainage, Paper 54*. FAO-ONU, Rome, Italie.
- FAO, 2005. *Livestock sector brief for Burkina Faso*. In: *Livestock Information, Sector Analysis and Policy Branch*. AGAL, FAO, Rome, Italy.
- Faulkner, J.W., Steenhuis, T., Van de Giesen, N., Andreini, M., Liebe, J., 2008. Water use and productivity of two small reservoir irrigation schemes in Ghana's Upper East Region. *Irrig. Drain.* 57 (2), 151–163, <http://dx.doi.org/10.1002/jird.384>.
- Fromageot, A., Cecchi, P., Parent, F., Coppetiers, Y., 2006. Ruptures économiques sans ruptures sociales: le maraîchage et la santé des paysanneries sénégalaises entre résilience et vulnérabilité. *Ann. Geogr.* 115, 49–68.
- Guobin, F., Changming, L., Shulin, C., Jialian, H., 2004. Investigating the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans. *Hydrol. Processes* 18, 2247–2262, <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.5526>.
- Güntner, A., Krol, M.S., Araújo, D.J.C., Bronstert, A., 2004. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semi-arid region. *Hydrol. Sci. J.* 49 (5), 901–918.
- Herschey, R.W., 1973. The magnitude of errors at flow measurement stations. In: *Proceedings of the Koblenz Symposium on Hydrometry*. IAHS Publ., pp. 109–131, 99.
- Ibrahim, B., Polcher, J., Karambiri, H., Rockel, B., 2012. Characterization of the rainy season in Burkina Faso and its representation by regional climate models. *Clim. Dyn.* 39 (6), 1287–1302, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1276-x>.
- Ikebuchi, S., Seki, M., Ohtoh, A., 1988. Evaporation from Lake Biwa. *J. Hydrol.* 102 (1–4), 427–449.
- Karambiri, H., Fowe, T., Barbier, B., Some, Y.S.C., Ibrahim, B., Yacouba, H., Diarra, A., 2012. *Hydrological characterization of the sites of Boura (Burkina Faso) and Binaba II (Ghana)*. In: *Technical Report of Challenge Program on Water and Food*.
- Kampf, S.K., Burges, T.J., 2010. Quantifying the water balance in a planar hillslope plot: effects of measurement errors on flow prediction. *J. Hydrol.* 380, 191–202, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.036>.
- Kingumbi, A., Besbes, M., Bourges, J., Garetta, P., 2002. Transfer evaluation between dam and aquifers by the balance method in semi-arid region. The El Haouareb case in Central Tunisia. *J. Water Sci.* 17 (2), 213–225.
- Lacombe, G., 2007. *Evolution et usages de la ressource en eau dans un bassin versant aménagé semi-aride. Le cas du Merguillil en Tunisie centrale*. Université Montpellier II, France (Thèse de Doctorat).
- Lee, T.M., Swancar, A., 1997. The influence of evaporation, groundwater, and uncertainty in the hydrologic budget of Lake Lucerne, a seepage lake in Polk County, Florida. In: *U.S. Geological Survey Wat. Sup. Paper (Washington D.C. US Government Printing Office)* 2439.
- Liebe, J., 2002. *Estimation of Water Storage Capacity and Evaporation Losses of Small Reservoirs in the Upper East Region of Ghana*. Germany, University of Bonn (Diploma Thesis).
- Liebe, J., van de Giesen, N., Andreini, M., 2005. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment. A case study in the Upper East Region of Ghana. *Phys. Chem. Earth* 30, 448–454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>.
- Liebe, J.R., van de Giesen, N., Andreini, M., Walter, M.T., Steenhuis, T.S., 2009. Determining watershed response in data poor environments with remotely sensed small reservoirs as runoff gauges. *Water Resour. Res.* 45, W07410, <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007369>.
- Lowe, L.D., Webb, A., Nathan, R.J., Etchells, T., Malano, H.M., 2009. Evaporation from water supply reservoirs: an assessment of uncertainty. *J. Hydrol.* 376, 261–274, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.037>.
- Nicola, M., 2005. *Development of a Water Balance for the Atankwidi Catchment, West Africa—A Case Study of Groundwater Recharge in the Semi-Arid Climate*. University of Bonn, 41, Cuvillier Verlag, Göttingen (PhD Thesis).
- Milville, F., 1991. *Etude Hydrodynamique et quantification de la recharge des aquifères en Climat Soudano-Sahélien: Application à un Bassin Expérimental au Burkina Faso*. In: *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, IAHS Publ., p. 199.
- Motz, L.H., Sousa, G.D., Annable, M.D., 2001. Water budget and vertical conductance for Lowry (Sand Hill) Lake. *J. Hydrol.* 250, 134–148.
- Mugabe, F.T., Hodnett, M.G., Senzanje, A., 2003. Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semi-arid Zimbabwe. *Agric. Water Manage.* 62, 149–163, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00077-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00077-5).
- Mustapha, M.K., 2009. *Problems, challenges and management of small, shallow tropical African reservoirs: a case study of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria*. *Int. J. Lakes Riv.* 2 (1), 163–174.
- Oblinger, J.A., Moysey, S.M.J., Ravindrinath, R., Guha, C., 2010. A pragmatic method for estimating seepage losses for small reservoirs with application in rural India. *J. Hydrol.* 385, 230–237, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.023>.
- PCD, 2007. *Plan Communal de Développement de Boura, Burkina Faso, Rapport final*. BGB MERIDIEN.
- Peel, M.C., Blöschl, G., 2011. Hydrological modeling in a changing world. *Prog. Phys. Geogr.* 33 (6), 837–844, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133311402550>.
- Piper, B.S., Plinston, D.T., Sutcliffe, J.V., 1986. The water balance of Lake Victoria. *Hydrol. Sci. J.* 31 (1), 25–37, [doi.org/10.1080/02626668609491025](http://dx.doi.org/10.1080/02626668609491025).
- Pouyaud, B., 1990. *L'évaporation des nappes d'eau libre en climat soudano-sahélien*. *Int. Water Resour. Urbana, IL*, pp. 169–180.
- Rakhmatullaev, S., 2010. *Improvement of Operational Methods for the Assessment of the Lake Reservoir Useful Storage Capacity Using Geoinformation Systems: Case Study of the Akdarya Reservoir*. University Bordeaux 1, Samarqand Province, Uzbekistan (Dissertation).
- Rosenberry, D.O., Winter, T.C., Buso, D.C., Likens, G.E., 2007. Comparison of 15 evaporation models applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *J. Hydrol.* 340, 149–166, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018>.
- Sacks, L.A., Swancar, A., Lee, T.M., 1998. Estimating groundwater exchange with lakes using water-budget and chemical mass-balance approaches for ten lakes in ridge areas of Polk and Highlands Counties, Florida. In: *U.S. Geological Survey Water-Resour. Inv. Rep.*, pp. 98–4133.
- Salami, Y.D., Nnadi, F.N., 2012. Reservoir storage variations from hydrological mass balance and satellite radar altimetry. *Int. J. Water Resour. Environ. Eng.* 4 (6), 201–207, <http://dx.doi.org/10.5897/IJWREE11.140>.
- Sander, D.H., 2010. *Hydrologie et choix de sites d'implantation des micro-barrages autour de Léo, Burkina Faso*. In: *Rapport de mission du projet de Aqua for All*.
- Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J.-L., Galle, S., Peugeot, C., Gosset, M., Le Barbé, L., Malinur, F., Van Exter, S., Arjounin, M., Boubkraoui, S., Wubda, M., 2011. Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: the Donga basin (Benin, West Africa) Inter-annual variability of water budget. *J. Hydrol.* 402 (1–2), 1–13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.054>.
- Sukhija, B.S., Reddy, D.V., Nandakumar, M.V., Rama, 1997. A method for evaluation of artificial recharge through percolation tanks using environmental chloride. *Ground Water* 35 (1), 161–165.
- Tanny, J., Cohen, S., Assouline, S., Lange, F., Grava, A., Berge, D., Teltch, B., Parlange, M.B., 2008. Evaporation from a small water reservoir: direct measurements

- and estimates. *J. Hydrol.* 351, 218–229, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.012>.
- Ufoegbune, G.C., Yusuf, H.O., Eruola, A.O., Awomeso, J.A., 2011. Estimation of water balance of Oyan Lake in the North West Region of Abeokuta, Nigeria. *Br J. Environ. Clim. Change* 1 (1), 13–27.
- UNESCO, 2012. *International Glossary of Hydrology*. UNESCO, Geneva 2, Switzerland.
- Venot, J.P., Cecchi, P., 2011. Valeurs d'usage ou performances techniques: comment apprécier le rôle des petits barrages en Afrique subsaharienne. *Cah. Agric.* 20 (1–2), 112–117.
- Venot, J.P., Krishnan, J., 2011. Discursive framing: debates over small reservoirs in the Rural South. *Water Altern.* 4 (3), 316–324.
- Winter, T.C., 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resour. Bull.* 17 (1), 82–115.

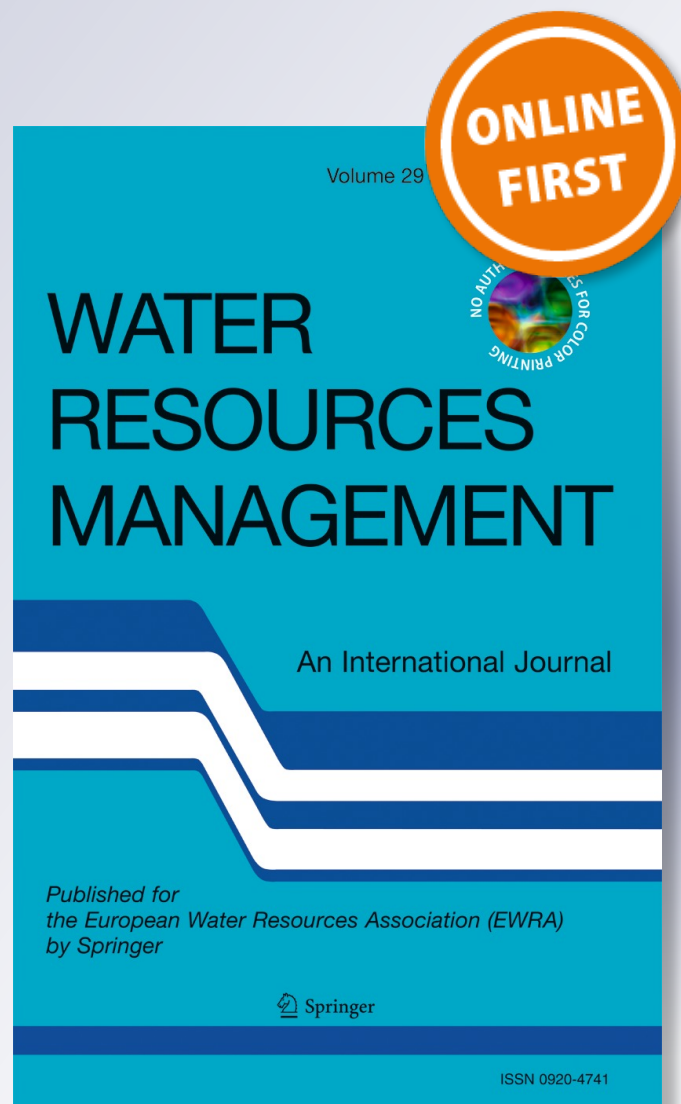
OPTIWAM: An Intelligent Tool for Optimizing Irrigation Water Management in Coupled Reservoir–Groundwater Systems

**T. Fowe, I. Nouri, B. Ibrahim,
H. Karambiri & J. E. Paturel**

Water Resources Management
An International Journal - Published
for the European Water Resources
Association (EWRA)

ISSN 0920-4741

Water Resour Manage
DOI 10.1007/s11269-015-1032-9



OPTIWAM: An Intelligent Tool for Optimizing Irrigation Water Management in Coupled Reservoir–Groundwater Systems

T. Fowe¹ · I. Nouiri² · B. Ibrahim³ · H. Karambiri¹ ·
J. E. Paturel^{1,4}

Received: 23 July 2014 / Accepted: 10 May 2015 /

Published online: 24 May 2015

© Springer Science+Business Media Dordrecht 2015

Abstract An approach based on a real coded Genetic Algorithm (GA) model was used to optimize water allocation from a coupled reservoir-groundwater system. The GA model considered five objectives: satisfying irrigation water demand, safeguarding water storage for the environment and fisheries, maximizing crop water productivity, protecting the downstream ecosystem against elevated soil salinity and hydromorphic issues, and reducing the unit cost of water. The model constraints are based on hydraulic and storage continuity requirements. The objectives and constraints were combined into a fitness function using a weighting factor and the penalty approaches. The decision variable was water allocation for irrigation demand from reservoir and groundwater. The irrigation water demands around the reservoir were estimated using the Food and Agriculture Organization (FAO) Penman-Monteith method in the water evaluation and planning (WEAP) software. The deterministic GA model was coded using Visual Basic 6 and a new tool for irrigation water management optimization (OPTIWAM) was developed. To validate the applicability of the deterministic model for the operation of coupled reservoir-groundwater systems, the Boura reservoir (in the center-west region of Burkina Faso) and the downstream irrigation area were used as a case study. Results show that the proposed methodology and the developed tool are effective and useful for

✉ I. Nouiri
inouiri@yahoo.fr

¹ Hydrology and Water Resources Laboratory, International Institute for Water and Environmental Engineering (2iE), 01 BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso

² National Institute of Agronomy of Tunisia, 43 Avenue Charles Nicolle, 1082 le Mahrajène Tunisia

³ West African Science Service Center on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL), 06 BP 9507, Ouagadougou, Burkina Faso

⁴ IRD-HydroSciences Montpellier, Université Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 5, France

determining optimal allocation of irrigation water. Furthermore, the methodology and tool can improve water resources management of coupled reservoir-groundwater systems.

Keywords Irrigation · Water resources · Allocation · Optimization · Genetic algorithms

1 Introduction

In many regions in the world, particularly in developing regions such as Africa, availability and access to freshwater largely determines patterns of economic growth and social development (Odada 2006). Thousands of small reservoirs dot the landscape of rural sub-Saharan Africa (Venot and Krishnan 2011) and provide water for multiple uses including agriculture, livestock watering, fisheries, households and others (Faulkner et al. 2008; Andreini et al. 2009; Boelee et al. 2009; de Fraiture et al. 2014).

Reservoirs in West Africa were developed mainly to provide water for irrigation to increase crop production (Venot and Cecchi 2011). In Burkina Faso, the agriculture sector contributes about 35 % to the country's gross domestic product (FAOSTAT 2013) and more than 65 % of total water consumption is related to irrigation and agricultural development (MAHRH 2003). The development of irrigation has increased agricultural production and crop diversification, enhancing income generation, favoring labor creation, and promoting settlement of the rural population. Because water supply is inadequate in the semi-arid areas of West Africa, irrigation is used to supplement water supply for crops during the dry season.

Although reservoirs are initially designed for irrigation, aquaculture is subsequently introduced into these infrastructures. Fish production is also an important para-agricultural activity in rivers in West Africa. Fisheries are conceptually non-consumptive users of water, although water requirements to maintain fisheries have been estimated for different fishery cultures (Mdemu 2008; Tran et al. 2011a). Thus, maintaining the volume of water in the reservoirs is important for sustaining fisheries and also providing habitat to other aquatic life.

In addition, reservoirs play an important role in the sustainability of groundwater in arid and semi-arid areas. The seepage from reservoirs can be considered as a major source of recharge for aquifer systems. Groundwater is hydraulically connected to surface water in many regions of the world (Owor et al. 2011; Levy and Xu 2012). To withdraw groundwater, structures such as boreholes and hand-dug wells are used in West Africa although their usage is limited by cost. Because groundwater is generally less prone to pollution than surface water, it is mainly used for domestic water supply and watering livestock. The use of groundwater for irrigation is limited but can be considered as an alternative. Despite difficulties, agricultural groundwater development has had a long and varied tradition throughout Sub-Saharan Africa (SSA). Giordano (2006) estimated the total area irrigated by groundwater in SSA to be 1–2 million ha. Villholth (2013) updated the estimate of the current extent of groundwater irrigation in SSA. The total irrigated area using groundwater is significantly higher than the earlier estimate of 6 % proposed by Giordano in 2006. Laube et al. (2008) estimated that about 100–200 ha of land are cultivated with groundwater in the dry season in the Upper East Region in Ghana.

The spatial and temporal variability in rainfall, global climate change, land degradation and high population growth rates put immense pressure on water resources in West Africa (Descroix et al. 2009; Favreau et al. 2009; Karambiri et al. 2011). Clearly, surface water resources are very vulnerable to droughts. Lack of efficient management tools and procedures for assessing sustainable use of water resources in reservoirs exacerbates the situation (Tendai 2005).

A United Nations Environment Programme (UNEP) study (2002) revealed that, in the next decades, water demand will rise to levels that will make providing water for human use more difficult. It is clear that wise management is required to address the many challenges that confront the sustainability of water resources in West Africa. To secure water supplies in anticipation of the negative impacts of predicted climate change in the coming years, it is necessary to develop decision support systems for optimizing water allocation. There is an immense need to formulate strategies to utilize the available resources effectively and efficiently (Jothiprakash and Shanthi 2006; Suiadee and Tingsanchali 2007).

During the last several decades, various optimization techniques have been developed and used for solving water resources problems. Some state-of-the-art reviews of these techniques were provided by Yeh (1985), Labadie (2004), Rani and Madalena (2010) and Singh (2012). In recent years, the research community focused on soft computing techniques, such as Evolutionary Algorithms, and more specifically Genetic Algorithms (GAs). GAs have proven to be effective and suitable for solving optimization problems (Momtahan and Dariane 2007; Consoli et al. 2007; Azamathulla et al. 2008). GA models were also successfully applied to solve different optimization problems for reservoir operation by Jian-xia et al. (2005), Reddy and Kumar (2006), Li and Wei (2008), Jothiprakash and Shanthi (2009), Jothiprakash et al. (2011), Yang et al. (2013).

Yang et al. (2009) integrated multi-objective GA, constrained differential dynamic programming and groundwater simulation model to solve a water resources planning problem for the combined use of surface water and groundwater in southern Taiwan. Safavi et al. (2010) employed artificial neural networks (ANN) as a simulator and GA as an optimizer in the optimal operation of surface water and groundwater resources for the Najafabad plain in west-central Iran. (Chen et al. 2013a, b) proposed a hybrid approach consisting of GA and ANN for optimizing the combined use of surface water and groundwater resource management. Their results indicate that adding a groundwater system to a surface water system can significantly decrease the shortage index. RezapourTabari and Soltani (2013) applied a non-dominated sorting GA (NSGA-II) and a sequential GA (SGA) to determine the optimal trade-off between different management objectives for the combined use of surface water and groundwater. Safavi and Esmikhani (2013) developed a support vector machines (SVMs) model as a simulator of surface water and groundwater interaction model while GA was used as the optimization method. Noori et al. (2013) formulated a GA for optimal operation of a multipurpose multi-reservoir system. Nouri (2014) developed a multi-sexual GA to optimize the daily management of a hydraulic system in Tunisia. Recently, Fallah-Mehdipour et al. (2015) developed and applied a fixed length gene genetic programming (FLGGP) algorithm coupled with GA to derive the optimal operation of an aquifer- reservoir system.

Applications using GA approaches have covered many objectives such as: satisfying water demands (Zahraie and Hosseini 2009; Chang et al. 2010; Wang et al. 2011; Louati et al. 2011), maximizing the crop yields or maximizing the hydropower generation (Kumar et al. 2006; Chen et al. 2013a, b), maximizing the net benefit of water use (Suiadee and Tingsanchali 2007), minimizing water costs and use (Nouri 2014), and incorporating socio-economic and environmental aspects (Chang et al. 2010; Cai et al. 2013).

The novelty of this research is the integration of conflicting objectives of water management for irrigation in the problem formulation. The proposed methodology incorporates hydraulic, agronomic, environmental and economic objectives for management of a coupled reservoir-groundwater system. The approach based on a deterministic GA, allowed the

development of a decision support tool called OPTIWAM (OPTimizing Irrigation WATER Management).

The paper is organized as follows: Section 2 introduces the general conceptual model within a management area and presents the connectivity between different sub-systems. Section 3 presents the water management problem formulation, gives an overview of the main computational steps of the genetic algorithm for solving the problem, and provides detailed information on the case study and on the determination water demand for irrigation. Subsequently, the developed tool, OPTIWAM, is used to obtain the optimal solution for the reservoir-groundwater system. Section 4 shows the results and includes discussion about the findings of this study, as well as future research directions.

2 General Conceptual Model for Water Management

The general conceptual model is based on a single framework where sources, demands and transmission links are present. In the general conceptual model proposed (Fig. 1), sources are represented either by rectangles (groundwater: G) or by triangles (reservoir surface water: S) with indexes “gw” or “sw”. Demand sites “D” are represented by circles with index “d”. Connections between the model nodes (water sources and demand sites) are ensured by percolation and supply links represented by dotted and continuous lines, respectively.

It is assumed that within any given water management area, multiple sources with different water storage capacities can be used to satisfy the water requirements of demand sites. For groundwater sources, the storage capacity corresponds to the maximum water volume of the aquifer. However, of interest is the recharge to aquifer (dotted lines) which occurs via infiltration “ $V_{inf}(d, gw)$ ” from the surface water source and deep percolation from the

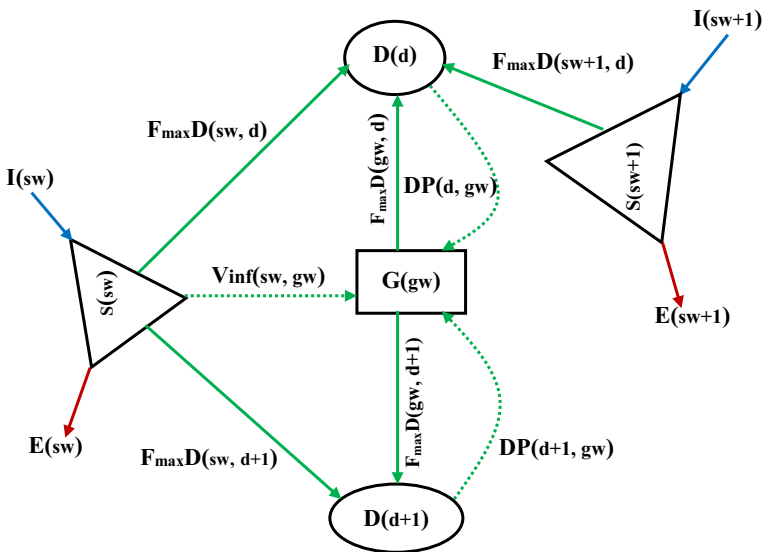


Fig. 1 Connectivity between water sources and demand sites within a management area (Adapted from Nouri 2014)

agriculture fields “ DP (d, gw)”. For surface water sources, the storage capacity is the maximum water volume that can be stored in the reservoir. This capacity is usually defined by the topography and the principal spillway level.

In the water management area, each surface water source “sw” can be supplied by inflows “ I (sw)” and is subjected to water losses “ E (sw)” due to net evaporation. In the proposed conceptual model, water transfer between surface water sources was not considered because such transfer is negligible for independent reservoirs.

It was also assumed that each of the demand sites should be supplied by at least one water source through a supply link (solid lines) that can be a pipe or a natural or artificial channel. Each supply link from source “se” to demand site “D(d)” is characterized by its maximum supply capacity “ $F_{max}D_{se,d}$ ” and its unit supply cost “ $P_{t_{se,d}}$ ” which depend on the infrastructure (pipelines, pumping stations and outlet capacities) and on the operating rules, respectively. The index “se” indicates that the relative information is valid for both water sources.

To model each reservoir “sw”, maximum and minimum storage capacities, “ V_{max_sw} ” and “ V_{min_sw} ” respectively, are needed. These parameters are obtained from the continuous elevation-volume curve.

Initial conditions of the sources must be specified at the beginning of the modeling, in particular, the initial amount of water stored “ V_{ini_sw} ”. For each demand site “d”, it is necessary to specify the required water volume “ D_d^t ”.

The decision variable is the water supplied by each water source “se” to each demand site “d” at any time interval t : “ $F_{se,d}^t$ ”, over the management period “0-T”.

3 Optimization Model Development

3.1 Mathematical Model Formulation

3.1.1 Objective Functions

In this study, water resources management is formulated as a constrained multi-objective problem with five objectives. The first objective is to satisfy water needs of demand sites “d” at every time interval “ t ” of the management period “0-T”. This objective is expressed by minimizing the following unmet demand function “ f_{DNS} ” (Pilpayeh et al. 2010; Jothiprakash et al. 2011; Giuliani et al. 2014)

$$f_{DNS} = \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\frac{\sum_{sw=1}^{N_{sw}} F_{sw,d}^t + \sum_{gw=1}^{N_{gw}} F_{gw,d}^t - D_d^t}{\sum_{sw=1}^{N_{sw}} F_{max}D_{sw,d} + \sum_{gw=1}^{N_{gw}} F_{max}D_{gw,d}} \right)^2 \tag{1}$$

where Δt is the time step. The time step depends on the dynamics of the managed system and the management objectives. For short-term operation, the time step can be hourly or daily, while for long-term operation, the time step can be monthly or yearly. “ND” is the number of demand sites, “ N_{sw} ” and “ N_{gw} ” are the number of surface water sources and aquifers in the management area, respectively.

The second objective is to guarantee water supply for the ecological system and for fisheries throughout the study period. This objective is expressed by minimizing the deviation to the full storage function “ f_{NR} ” (Pabiot 1999; Tran et al. 2011b).

$$f_{NR} = \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{sw=1}^{Nsw} \left(\frac{V_{sw}^t - V_{max_sw}}{V_{max_sw}} \right)^2 \tag{2}$$

where “ V_{max_sw} ” and “ V_{sw}^t ” are respectively the maximum storage capacity and the storage at the end of time period t corresponding to the surface water source “sw”.

The third objective is to improve water productivity (WP) throughout the management period. Water productivity is represented by crop production per unit volume of water that is supplied from the sources (Playán and Mateos 2006; Mdemu et al. 2009). This objective is expressed by minimizing the water productivity losses function “ f_{WP} ” as follows:

$$f_{WP} = \left(\frac{WP_{max} - WP}{WP_{max}} \right)^2 \tag{3}$$

where “ WP_{max} ” is the maximum water productivity.

Water production functions can be computed on the basis of evapotranspiration or consumptive water use or on the basis of applied irrigation water. “WP” and “ WP_{max} ” are given by the following Eqs. (4) and (5)

$$WP = \frac{\sum_{d=1}^{ND} \sum_{cp=1}^{Ncp} \omega_{cp} \times Y_{d,cp} \times A_{d,cp}}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t + \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t \right)} \tag{4}$$

$$WP_{max} = \frac{\sum_{cp} \omega_{cp} \times Y_{max,cp}}{T \sum_{t=\Delta t}^T \sum_{cp=1}^{Ncp} ETM_{cp}^t} \tag{5}$$

$$\sum_{cp=1}^{Ncp} \omega_{cp} = 1 \tag{6}$$

where

“ $Y_{d,cp}$ ” is the crop “cp” yield at site “d” [kg/ha] over the management period, “ $Y_{max,cp}$ ” is the potential crop yield [kg/ha], “ ω_{cp} ” is the weighting coefficient associated to the crop “cp”; “ $A_{d,cp}$ ” is the cultivated area for crop “cp” at site “d” [ha] and “ ETM_{cp}^t ” is the crop evapotranspiration during the time period “ t ” [mm].

To account the response of crop yield to irrigation, a water production function (Rao et al. 1988) was adapted from the method proposed by Fang et al. (1989).

The fourth objective is to protect the downstream ecosystem against soil salinity and hydromorphic issues by maintaining the groundwater level. This objective is expressed by minimizing the deviation function “ f_{Env} ” between the total inputs (reservoir infiltration and deep percolation from the plots) and the total water withdrawal from the aquifers throughout the management period.

$$f_{Env} = \left(\frac{\sum_{t=\Delta t}^T \left(\sum_{d=1}^{ND} \sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t - \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} V_{inf_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} i_d \times (1-\alpha_d) \times BP_d^t \right) \right)}{\sum_{t=\Delta t}^T \left(\sum_{sw=1}^{Nsw} V_{inf_sw}^t + \sum_{d=1}^{ND} i_d \times (1-\alpha_d) \times BP_d^t \right)} \right)^2 \tag{7}$$

where “ $V_{inf_sw}^t$ ” is the volume of reservoir infiltration into the aquifer during the time period “ t ”; “ i_d ” is the fraction of water losses in the plots by deep percolation, “ BP_d^t ” is the water requirement for demand site “ d ” during the time period “ t ” and “ α_d ” is the irrigation efficiency for demand site “ d ”.

The fifth objective is minimizing the unit cost of water over the management area throughout the study period. The sum of all the costs of water supplied to demand sites was computed. The total cost was then divided by the total volume of water supplied and standardized by the maximum unit cost of water (Cai et al. 2003; Gartley et al. 2009; Nouri 2014). The unit cost is expressed by the following equation:

$$f_c = \frac{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left[\sum_{gw=1}^{Ngw} (Pu_{gw,d} \times F_{gw,d}^t) + \sum_{sw=1}^{Nsw} (Pu_{sw,d} \times F_{sw,d}^t) \right]}{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{d=1}^{ND} \left(\sum_{gw=1}^{Ngw} F_{gw,d}^t + \sum_{sw=1}^{Nsw} F_{sw,d}^t \right)} \times Pu_{max} \tag{8}$$

where “ $Pu_{sw,d}$ ” is the unit cost of surface water supply “ sw ” to the demand site “ d ”, “ $Pu_{gw,d}$ ” is the unit cost of aquifer supply “ gw ” to the demand site “ d ”, and “ Pu_{max} ” is the maximum unit cost of the sources.

3.1.2 System Constraints

The model must respect the following constraints:

Hydraulic constraints (physical restrictions)

The hydraulic constraints are the minimum and maximum values for acceptable active storage in the surface water sources “ sw ”, and the maximum flow capacities of transmission links from sources to demand sites in any time period. These constraints are given by Eqs. (9) and (10a and 10b):

$$V_{min_sw} \leq V_{sw}^t \leq V_{max_sw}, \quad \forall sw \wedge \forall t \tag{9}$$

$$0 \leq F_{sw,d}^t \leq F_{max} D_{sw,d}, \quad \forall sw \wedge \forall d \wedge \forall t \tag{10a}$$

$$0 \leq F_{gw,d}^t \leq F_{max} D_{gw,d}, \quad \forall gw \wedge \forall d \wedge \forall t \tag{10b}$$

- Typically uses a coding of potential solutions, not the solutions themselves;
- Searches the solution space from a population of solutions, not a single solution, including discontinuities that can cause difficulties for calculus-based methods;
- Works directly with the objective function, thus requiring no additional knowledge about its derivatives;
- Uses probabilistic, not deterministic, search rules (Goldberg 1989).

A GA starts with an initial population of randomly generated solutions (chromosomes) with respect to the problem constraints. Each chromosome, representing a solution to the problem, is formed by a set of genes. Each gene represents a decision variable value of the problem (real coded solutions).

Each solution in the population is evaluated by maximizing a fitness function. After evaluation, the chromosomes with the best fitness function value are copied into the next generation (elitist evolution strategy). The number of these chromosomes depends on the crossover rate and the population size.

To form the next generation, the crucial mechanism of the “survival of the fittest” is applied to the chromosome based on the tournament selection method (Goldberg and Deb 1991). This method gives the opportunity to weak solutions, with some good genes, to participate to the creation of the next generation.

The arithmetic crossover, which operates on two selected chromosomes (parents), produces two new individuals (offspring) with the crossover rate (P_{cros}). Mutation is an important process that permits new genetic material to be introduced to a population, maintaining diversity and preventing premature convergence to local optima. Mutation alters one individual, parent, to produce a single new individual, offspring with a mutation rate (P_m). In this study a random mutation operator was used. After mutation, the new population is evaluated.

This process (elitism-crossover-mutation-evaluation) is repeated until the optimal values of the decision variables are found. When the maximum number of generations is reached or when no improvement in the maximal fitness function is observed, resulting in stagnation, the iterative process is stopped.

To enable accessibility of the proposed tool for stakeholder system the multi-objective problem formulated above was transformed into a single objective one using the weighting factor approach (Elferchichi et al. 2009). Each stakeholder can act on the optimization results by changing the weight of the objectives, giving them more or less importance according to his or her priorities. This leads to the formulation of a global objective function to be minimized. A single objective GA is thus used to generate the optimal releases from the reservoir-groundwater system, while respecting the system constraints.

3.2.2 Fitness Function and Violations

In single objective GA approaches, the purpose is to maximize a fitness function used to evaluate a solution. Thus, minimizing the objectives was transformed into maximizing the fitness function. The fitness function that integrates the five objective functions and their associated constraints can be expressed by Eq. (14):

$$Fitness(s) = \sum_j p_j \times F_j(s), \quad j \in \{DNS, NR, WP, Env, c\} \quad (14)$$

with $\sum_j p_j = 1$; $p_j > 0$

$$F_j(s) = \frac{1}{1 + f_j(s)} \quad (15)$$

where “ $F_j(s)$ ” is the fitness function corresponding to the objective function “ $f_j(s)$ ” and “ p_j ” is the weighting coefficient associated to the fitness function “ $F_j(s)$ ”.

In the fitness function, the objective function “ $f_{NR}(s)$ ” taking into account the violations of acceptable volumes in surface water sources is given in Eq. (16):

$$f_{NR}^p(s) = f_{NR}(s) \times (1 + \text{ViolVmaxMax}(sw)) \times (1 + \text{ViolVminMax}(sw)) \quad (16)$$

where:

“ViolVmaxMax (sw)” is the maximum violation of the maximum acceptable volume in the reservoir “sw” expressed by Eq. (17):

$$\text{ViolVmaxMax (sw)} = \text{Max} \left(0, \frac{V_{sw}^t - V_{\text{max}_sw}}{V_{\text{max}_sw}} \right) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (17)$$

“ViolVminMax (sw)” is the maximum violation of the minimum acceptable volume in the reservoir “sw” expressed by Eq. (18):

$$\text{ViolVminMax (sw)} = \text{Max} \left(0, \frac{V_{\text{min}_sw} - V_{sw}^t}{V_{\text{min}_sw}} \right) \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (18)$$

The violation functions used in Eqs. (17) and (18) are bounded by 0, if there is no violation, and 1, when the violation is the maximum.

3.3 Case Study

3.3.1 Study Area Description

The study was conducted on the Boura reservoir (latitude 11.05° and longitude -2.49°), located in the center-west region of Burkina Faso near the border with Ghana. The Boura dam, built on the Kabarvaro River (tributary of Black Volta River) in 1983, is the single perennial surface water source in the Boura district that covers 1145 km^2 . The reservoir was equipped with irrigation infrastructure in 1985. The catchment area of about 150 km^2 is located in a region defined by the latitude range 10.94° – 11.07° and longitude range (-2.50°) – (-2.37°) lying the center-west region of Burkina Faso and upper west region of Ghana (Fig. 2).

The main features of the Boura reservoir are shown in Table 1. The maximum and minimum storage volumes of the reservoir are 4.2 and 0.34 million cubic meters (MCM), respectively. The catchment receives an average annual rainfall of 920 mm but exhibits a strong inter-annual variability over the period 1961 to 2010. Generally, the maximum inflow occurs during the month of July or August. The main purpose of the Boura reservoir is to satisfy agricultural water demands. The crop growing periods are classified into two categories: the wet period (June–October) and the dry period (November–May).

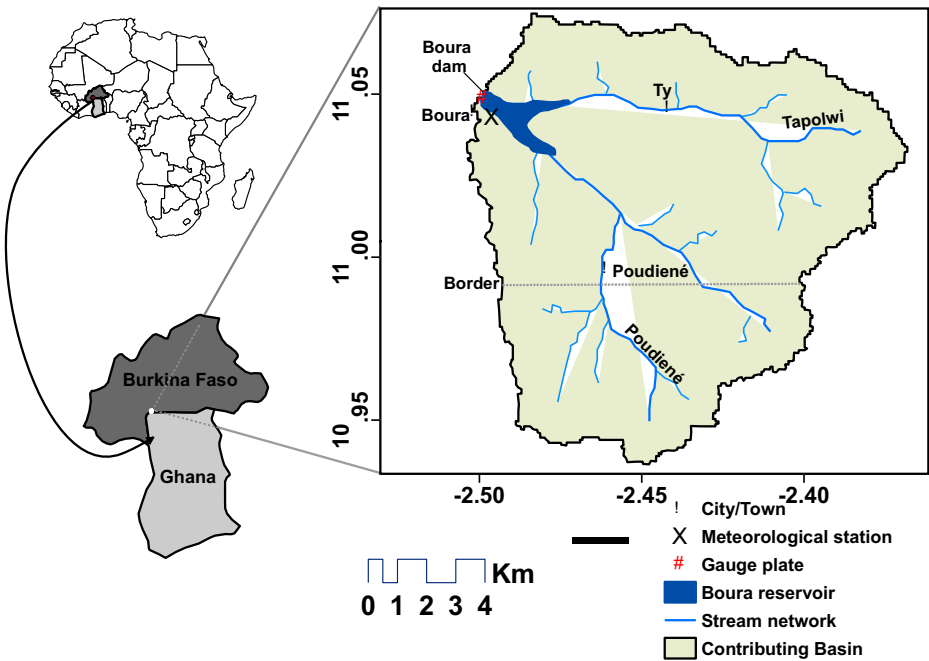


Fig. 2 Location of the Boura dam catchment with the hydrological monitoring system (Fowe et al. 2015)

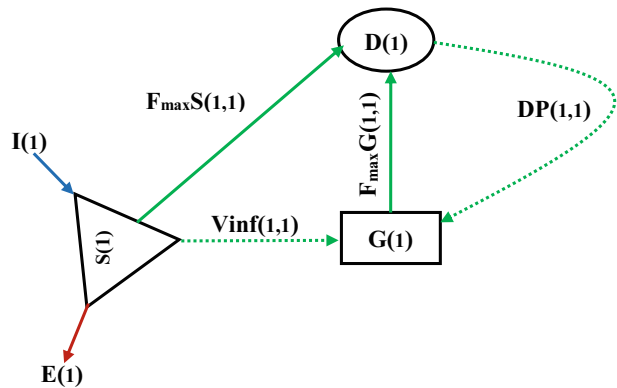
The conceptual model of the case study is presented in Fig. 3. The case study includes two water sources (S(1) and G(1)) and a single demand site D(1). The source S(1) is supplied by runoff $I(1)$ from the catchment while G(1) receives water from deep percolation from the plots DP(1,1) and reservoir seepage $V_{inf}(1,1)$. The demand site D(1) is gravity-fed by the upstream

Table 1 Morphometric characteristics of the Boura dam and its contributing catchment

Feature	Value
Full supply capacity (MCM)	4.2
Reservoir surface area (ha)	200
Length of dam wall (m)	750
Maximum height of dam wall (m)	6.25
Dam crest elevation (m)	276.25
Crest width (m)	3.5
Full supply level (m)	275
Spill length (m)	35
Minimum operation level (m)	272
Catchment area (km ²)	150
Maximum elevation (m)	349
Minimum elevation (m)	270
Global slope index (m/km)	4
Specific elevation (m)	37.24

Adapted from ONBI (1982, unpubl)

Fig. 3 Conceptual model of the case study



surface water $S(1)$ and is supplied by pumped water from $G(1)$. The aquifer $G(1)$ is considered an unlimited water source. This study is only concerned by changes of level in $G(1)$ due to reservoir seepage and deep percolation from irrigated plots.

Three main crops are cultivated in site $D(1)$: rice (during the dry and wet seasons), maize and tomatoes during the dry season.

Water losses from $S(1)$ are mainly caused by seepage and net evaporation. From monitoring data on site, the volumetric loss rate ranged between 3,425 and 9,743 m^3 per day depending on the month.

The maximum water supplied $F_{\max} S(1,1)$ and $F_{\max} G(1,1)$ from transmission links $S(1)$ – $D(1)$ and $G(1)$ – $D(1)$ are 350,000 and 100,000 m^3 per month, respectively. The unit supply costs from the surface water and aquifer sources are 8×10^{-3} and 50×10^{-3} USD per m^3 , respectively.

The above model was tested with data collected on-site for a period of one year (from November 2012 to October 2013).

3.3.2 Irrigation Water Demand Estimation

The irrigation water demands were computed using the WEAP-MABIA software package. Effective rainfall was estimated based on the rainfall amount (a fraction of 80 %).

The crop data (crop coefficients and duration of the development stages) and the soils profiles were obtained from WEAP-MABIA (“CropLibrary” and “SoilProperties”), data collected on-site, and from other studies (PCD 2007, *unpubl.*). Taking into account the water losses during conveyance and application to the field, the monthly water irrigation demands for agricultural fields as calculated by WEAP are shown in Table 2. Within the management period, the monthly water demand of $D(1)$ fluctuates between 3,761 and 266,744 m^3 per month. Average demand over the study period is estimated at 106,500 m^3 per month.

4 Results and Discussion

OPTIWAM was implemented for the Boura irrigation scheme to find the optimal monthly values of the 24 ($2 \times 1 \times 12 = 24$ where 2, 1 and 12 indicate respectively the number of water sources, demand site and months in the management period) decision variables for the water

Table 2 Monthly irrigation demand, net evaporation and reservoir inflows over the management horizon

Month	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul	Au	Sep.	Oct
Irrigation demand [$\times 10^3 \text{ m}^3$]	3.8	5.4	168.6	228.0	266.7	202.1	121.0	81.7	12.6	40.5	52.2	95.5
Runoff [$\times 10^3 \text{ m}^3$]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.2	3.5	77.8	1741.0	500.3	718.9	10.4
Net evaporation [mm]	148.4	142.1	163.4	171.6	189.0	141.3	197.5	146.8	-63.9	-46.2	30.8	109.1

supplied from the sources over a one year planning horizon. The chromosome length was equal to 24 genes.

A sensitivity analysis was performed to identify the best GA parameters. Initial tests converged to a population size of $NS=50$, a maximum number of iterations $NMG=1000$, a crossover rate of $P_{cros}=0.8$, a mutation rate of $P_m=0.01$, a percentage of elitism of $P_e=20\%$, and tournament size equal to 2.

The trend of the GA convergence with respect to above mentioned values of parameters is shown in Fig. 4. The best value of the fitness function is improved by the GA until the maximum value (0.7701371) is obtained. As shown, the performance reaches the level of 95 % of the maximum possible fitness within 150 and 200 generations.

The aquifer balance and the demand satisfaction were the first objectives achieved (less than 250 generations). The water productivity and the cost reduction were the most difficult objectives to achieve.

The water allocation pattern for the best solution is given in Fig. 5. A comparative graph of the water demand and the optimal water allocation for a deterministic yearly inflow shows that

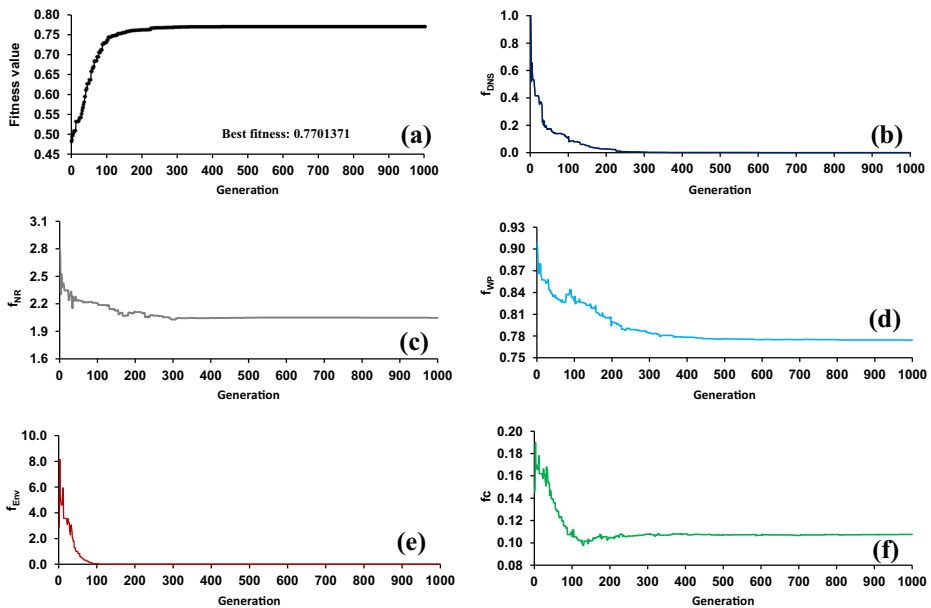


Fig. 4 Fitness function (a) and objective functions ((b) demand satisfaction, (c) Ecological reserve, (d) water productivity, (e) Aquifer balance and (f) cost reduction) curves over iterations

the demand is almost satisfied. The high water allocation is related to the peak of dry season (through February until the end of April) which is quite compatible with the high demands of water during this period.

The monthly relative errors “ $RE=100*(F_{tot} - D)/D$ ” (%) between of the water demand (D) and the water supplied (F_{tot}) are computed for the twelve months of the study period. The minimum value of RE is estimated at -6.06% in May. Water supplied to site $D(1)$ is greater than the water demand at the beginning and at the end of the water year with a maximum RE of 3.53% in November. There is high reliability in meeting the irrigation demands. Acceptable flow rate error in hydraulic systems is usually around $\pm 2\%$ (USBR and USDA 2001), thus the model can be considered as efficient and robust in terms of satisfying demand.

The optimal percentage of the relative contribution of $S(1)$ and $G(1)$ to satisfying demand for the optimal solution depends on the month. Except for November and July, low contribution percentages are observed for source $G(1)$. These low percentages are mainly due to the fact that there is still more water available into the reservoir, and the unit water cost of $G(1)$ is relatively high. The source $S(1)$ provided more than 80% of the total water demand of $D(1)$ over the study period.

The yields computed for different crops at the optimization time period are shown in Table 3. By assuming that all others agricultural inputs were optimal, the crop yields throughout the growing period will be affected by water deficits ($F_{tot} < D$). The yield losses are more pronounced for maize (4.5%).

The water productivity values for rice fall within the range ($0.4\text{--}1.6\text{ kg m}^{-3}$) proposed for Asia case study conditions (Tuong and Bouman 2003) and were comparable to those (0.56 kg m^{-3}) obtained in the upper east region of Ghana (Mdemu et al. 2009). The values of water productivity for maize obtained in this study were comparable for those ($0.4\text{--}0.7\text{ kg m}^{-3}$) reported in Tanzania (Igbadun et al. 2006) and were greater than those proposed in Burkina Faso (Some et al. 2006). Crop water productivity for tomatoes (2.28 kg m^{-3}) was very similar to that of the Dorongo irrigated scheme (2.58 kg m^{-3}) in Ghana (Mdemu et al. 2009).

The operating rule curves (normal and observed) obtained for Boura reservoir are shown in Fig. 6. The observed storage is the operating rule curve without taking into account the aquifer in the management strategy. It can be observed that the new management strategy with the addition of the aquifer source allows more water to be stored in the surface water source. An

Fig. 5 Optimal monthly water supply computed by OPTIWAM and water demand

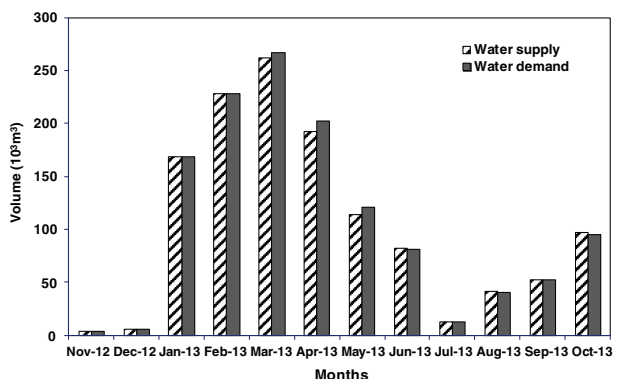


Table 3 Optimal crop yields and losses during the optimization horizon

Crops	Crop yield [kg ha ⁻¹]	Potential yield [kg ha ⁻¹]	Cultivated areas [ha]	WP [kg m ⁻³]	WPmax [kg m ⁻³]	Yield loss [%]
Dry rice	6924	7000	68	0.49	0.70	1.10
Wet rice	7000	7000	40	0.98	1.00	0.00
Maize	4776	5000	8	0.49	0.53	4.50
Tomatoes	21646	22000	4	2.28	3.05	1.60

additional water volume of about 0.7 MCM is preserved in the surface reservoir at the end of management period. The maximum storage is observed at the start of September and consequently reduces to a minimum in June at the start of next rainy season. The storage decrease is due to water withdrawals, net evaporation, and the lack of inflow into the reservoir during this period. The increase from June through September in storage is mainly due to a significant inflow into the reservoir while the water demand is low. No violations of the minimum and maximum storage capacities were observed. This indicates that, with the amounts of water supplied, optimal sources management was reached. This illustrates that, with knowledge of initial storage data, optimal monthly water supply can be achieved.

The optimization processes are considered for three scenarios of initial storage representing wet, dry and very dry seasons in the study area with initial storage Vmax, 75 % Vmax and 50 % Vmax respectively (Vmax=4.2 MCM). As shown in Fig. 6, changes in the initial storages affect the reservoir storage volume at the end of each month. The minimum and maximum reservoir storages respectively in June and September decrease when the initial storage is low. There is difficulty in meeting irrigation demands especially in dry and very dry seasons.

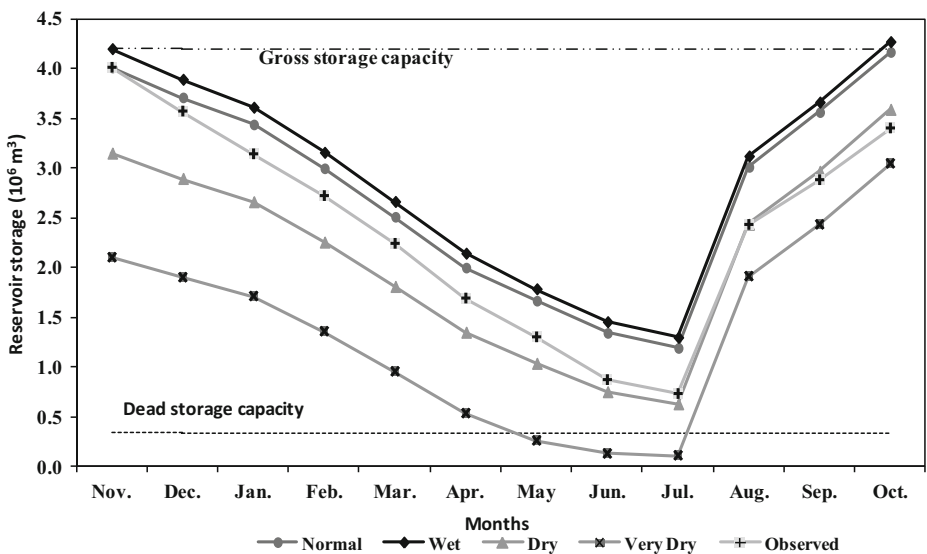


Fig. 6 Changes in water storage volume during the optimization period for different initial storages and observed storage

Reliability is a measure of the frequency of the reservoir without violations of the acceptable limits of reservoir over the management period (T).

$$\text{Reliability}[\%] = 100 \times \left(1 - \frac{n_f}{T}\right) \quad (19)$$

where n_f is the total number of time steps with violation.

Table 4 shows the reliability obtained for wet, dry and very dry seasons estimated as 92, 100 and 75 %, respectively. For the dry season in June, the minimum storage is very close to the dead storage. In the wet season, the violation of the maximum permissible volume of the reservoir is observed in September. Three violations of the dead storage capacity are observed in April, May and June in the very dry season (Fig. 6).

Figure 7 shows the optimal monthly water supply computed by OPTIWAM for Wet (a), Dry (b) and Very Dry (c) scenarios. This graph shows that it would be difficult to satisfy water demand from March to June in the very dry scenario with the current uses. The result shows that, when the initial storage is very low (pessimistic scenario 3), there is no water supplied from the surface reservoir between May and July; therefore only the aquifer satisfies water demands.

This study combines modeling of the hydraulic, agronomic and environmental processes for the optimal management of a coupled reservoir-groundwater system. The proposed approach integrates field data with irrigation water demand computed by WEAP. This methodology enables the identification of realistic optimal solutions for system operations.

The proposed tool constitutes a first step. Improvements can be added in terms of problem formulation and resolution methodology. Multi-objective resolution is a promising option leading to more flexible decision making at the governmental level. Accurate input data are required to guarantee the best quality of the outputs.

More functionality can be also added allowing the tool to communicate with the WEAP-MODFLOW framework. This makes it possible to profit from the capabilities of a suite of tools to compute water demand and surface water-groundwater interactions (Droubi et al. 2008).

5 Conclusions

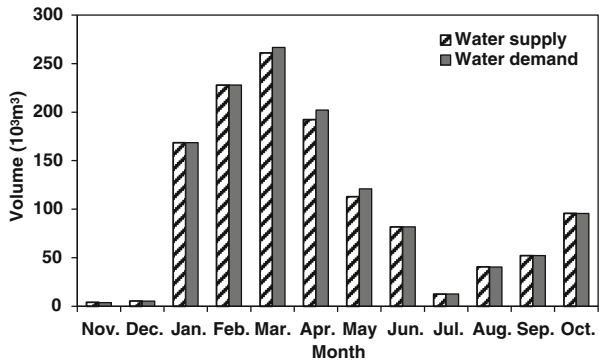
The purpose of this study is to derive an optimal reservoir-groundwater system management by quantifying the water allocation from different sources. The proposed multi-objective problem integrates demand satisfaction, ecological needs, water productivity, aquifer water

Table 4 Indicators of reliability in rule curves during the management horizon

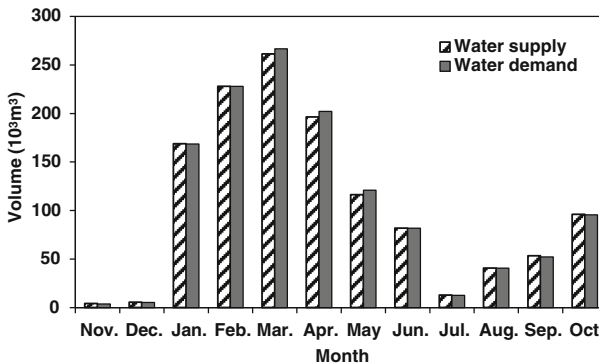
Scenario	NMVmin ⁱ	NMVmax ⁱⁱ	Reliability [%]
Wet	0	1	92
Dry	0	0	100
Very dry	3	0	75

ⁱ Number of minimum storage violation

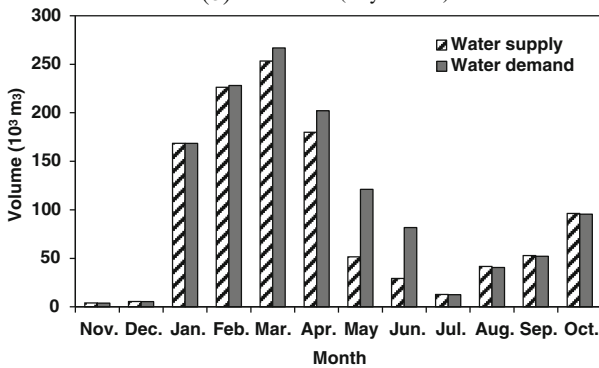
ⁱⁱ Number of maximum storage violation



(a) Scenario 1 (Wet season)



(b) Scenario 2 (Dry season)



(c) Scenario 3 (Very Dry season)

Fig. 7 Optimal monthly water supply computed by OPTIWAM for different initial storages scenarios and water demand

balance, reduction of the unit water cost and compliance with hydraulic and storage continuity constraints. A GA model using the sum weighting method was used to solve the problem and to recommend optimal water management.

A case study was used to test the developed optimization tool. Irrigation water demands were estimated from water requirements of the irrigated areas. The water losses by evaporation and seepage were determined from storage volumes using deterministic models previously

fitted to measured data. Results demonstrated the robustness of the tool to identify optimal solutions and its computational efficiency.

The model results for irrigation water supply are very close to the irrigation demand. Minimum storage is observed at the start of the rainy season and maximum storage is observed when the rainy season reaches its peak. These types of rule curves are expected in the actual operation of the reservoir.

Acknowledgments This research was carried out through the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Challenge Program on Water and Food (CPWF), which is funded by the UK Department for International Development (DFID), the European Commission (EC), the International Fund for Agricultural Development (IFAD), and the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC). This work is a contribution to the «Integrated Management of Small Reservoirs in the Volta Basin» sub-project, led by the “*Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*” (CIRAD, Montpellier, France). Also, the first author wishes to express his grateful thanks to the National Institute of Agronomy of Tunisia (INAT) for the opportunity afforded for the realization of this study.

References

- Ahmed J, Sarma A (2005) Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water Resour Manag* 19:145–161. doi:[10.1007/s11269-005-2704-7](https://doi.org/10.1007/s11269-005-2704-7)
- Andreini M, Schuetz T, Senzanje A, et al. (2009) CPWF project number 46 report: Small multi-purpose reservoir ensemble planning. CGIAR Challenge Program on Water and Food Project Report series
- Azamathulla H, Wu F, Ab A et al (2008) Comparison between genetic algorithm and linear programming approach for real time operation. *J Hydro Environ Res* 2:172–181. doi:[10.1016/j.jher.2008.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jher.2008.10.001)
- Boelee E, Cecchi P, Koné A (2009) Health impacts of small reservoirs in Burkina Faso. IWMI Working Paper 136. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. doi:[10.3910/2009.202](https://doi.org/10.3910/2009.202).
- Cai W, Zhang L, Zhu X et al (2013) Optimized reservoir operation to balance human and environmental requirements: a case study for the three Gorges and Gezhouba Dams, Yangtze River basin, China. *Ecol Inform* 18:40–48. doi:[10.1016/j.ecoinf.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.06.009)
- Cai X, Asce M, Mckinney DC et al (2003) Integrated hydrologic-agronomic-economic model for River Basin management. *J Water Resour Plan Manag* 129:4–17
- Celeste AB, Billib M (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Adv Water Resour* 32:1429–1443. doi:[10.1016/j.advwatres.2009.06.008](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.06.008)
- Chang L, Chang F, Wang K, Dai S (2010) Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *J Hydrol* 390:66–74. doi:[10.1016/j.jhydrol.2010.06.031](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.031)
- Chen Q, Chen D, Li R et al (2013a) Adapting the operation of two cascaded reservoirs for ecological flow requirement of a de-watered river channel due to diversion-type hydropower stations. *Ecol Model* 252:266–272. doi:[10.1016/j.ecolmodel.2012.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.008)
- Chen YW, Chang LC, Huang CW, Chu HJ (2013b) Applying genetic algorithm and neural network to the conjunctive use of surface and subsurface water. *Water Resour Manag* 27:4731–4757. doi:[10.1007/s11269-013-0418-9](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0418-9)
- Consoli S, Matarazzo B, Pappalardo N (2007) Operating rules of an irrigation purposes reservoir using multi-objective optimization. *Water Resour Manag* 22:551–564. doi:[10.1007/s11269-007-9177-9](https://doi.org/10.1007/s11269-007-9177-9)
- De Fraiture C, Kouali GN, Sally H, Kabre P (2014) Pirates or pioneers? Unplanned irrigation around small reservoirs in Burkina Faso. *Agric Water Manag* 131:212–220. doi:[10.1016/j.agwat.2013.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.001)
- Descroix L, Mahé G, Lebel T et al (2009) Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: a synthesis. *J Hydrol* 375:90–102. doi:[10.1016/j.jhydrol.2008.12.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.012)
- Droubi A, Al-Sibai M, Abdallah A, Zahra S, Obeissi M, Wolfer J, Huber M, Hennings V, Schelkes KA, (2008) Decision support system (DSS) for water resources management, -design and results from a pilot study in Syria. In: Zereini F, Hötzl H (Eds.) *Climatic changes and water resources in the Middle East and North Africa*. Springer, p 199–225
- Elferchichi A, Gharsallah O, Nouri I et al (2009) The genetic algorithm approach for identifying the optimal operation of a multi-reservoirs on-demand irrigation system. *Biosyst Eng* 102:334–344. doi:[10.1016/j.biosystemseng.2008.12.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.12.009)

- Fallah-Mehdipour E, Bozorg Haddad O, Alimohammadi S, Loáiciga HA (2015) Development of real-time conjunctive use operation RULES for aquifer-reservoir systems. *Water Resour Manag* 29:1887–1906. doi: [10.1007/s11269-015-0917-y](https://doi.org/10.1007/s11269-015-0917-y)
- Fang XZ, Voron B, Bocquillon G (1989) Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation. *Hydrol Sci J* 34:415–424
- FAOSTAT (2013) FAOSTAT database. Rome, Italy
- Faulkner JW, Steenhuis T, van de Giesen N et al (2008) Water use and productivity of two small reservoir irrigation schemes in Ghana's Upper East Region. *Irrig Drain* 57:151–163. doi: [10.1002/ird](https://doi.org/10.1002/ird)
- Favreau G, Cappelaere B, Massuel S et al (2009) Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: a review. *Water Resour Res* 45:W00A16. doi: [10.1029/2007WR006785](https://doi.org/10.1029/2007WR006785)
- Forrest S (1993) Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation. *Sci New Ser* 261: 872–878
- Fowe T, Karambiri H, Paturel J-E et al (2015) Water balance of small reservoirs in the Volta basin: a case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agric Water Manag* 152:99–109
- Gartley ML, George B, Davidson B, et al. (2009) Hydro-economic modelling of the upper Bhima catchment, India. 18th World IMACS / MODSIM Congr. Cairns, Australia, pp 3831–3837
- Giordano M (2006) Agricultural groundwater use and rural livelihoods in sub-Saharan Africa: a first-cut assessment. *Hydrogeol J* 14:310–318. doi: [10.1007/s10040-005-0479-9](https://doi.org/10.1007/s10040-005-0479-9)
- Giuliani M, Galelli S, Soncini-Sessa R (2014) A dimensionality reduction approach for many-objective Markov decision processes: application to a water reservoir operation problem. *Environ Model Softw* 57:101–114. doi: [10.1016/j.envsoft.2014.02.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.011)
- Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Publishing Co., Inc., Reading
- Goldberg DE, Deb K (1991) A comparative analysis of selection used in genetic algorithms schemes. *Urbana* 51: 61801–62996
- Holland JH (1975) Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor
- Igbadun HE, Mahoo HF, Tarimo AKPR, Salim BA (2006) Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. *Agric Water Manag* 85:141–150. doi: [10.1016/j.agwat.2006.04.003](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.04.003)
- Jian-xia C, Qiang H, Yi-min W (2005) Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching. *Water Resour Manag* 19:321–331. doi: [10.1007/s11269-005-3018-5](https://doi.org/10.1007/s11269-005-3018-5)
- Jothiprakash V, Shanthi G (2009) Comparison of policies derived from stochastic dynamic programming and genetic algorithm models. *Water Resour Manag* 23:1563–1580. doi: [10.1007/s11269-008-9341-x](https://doi.org/10.1007/s11269-008-9341-x)
- Jothiprakash V, Shanthi G (2006) Single reservoir operating policies using genetic algorithm. *Water Resour Manag* 20:917–929. doi: [10.1007/s11269-005-9014-y](https://doi.org/10.1007/s11269-005-9014-y)
- Jothiprakash V, Shanthi G, Arunkumar R (2011) Development of operational policy for a multi-reservoir system in India using genetic algorithm. *Water Resour Manag* 25:2405–2423. doi: [10.1007/s11269-011-9815-0](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9815-0)
- Karambiri H, Garcia Galiano SG, Giraldo JD et al (2011) Assessing the impact of climate variability and climate change on runoff in West Africa: the case of Senegal and Nakambe River basins. *Atmos Sci Lett* 12:109–115. doi: [10.1002/asl.317](https://doi.org/10.1002/asl.317)
- Kumar DN, Raju KS, Ashok B (2006) Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *J Irrig Drain Eng* 132:123–129
- Labadie JW (2004) Optimal operation of Multireservoir systems: State-of-the-art review. *J Water Resour Plan Manag* 130:93–111
- Laube W, Awo M, Schraven B (2008) Erratic rains and erratic markets: Environmental change, economic globalisation and the expansion of shallow groundwater irrigation in West Africa. ZEF Working Paper Series 30. Center for Development Research, University of Bonn
- Levy J, Xu Y (2012) Review: groundwater management and groundwater / surface-water interaction in the context of South African water policy. *Hydrogeol J* 20:205–226. doi: [10.1007/s10040-011-0776-4](https://doi.org/10.1007/s10040-011-0776-4)
- Li X-G, Wei X (2008) An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. *Water Resour Manag* 22:1031–1049. doi: [10.1007/s11269-007-9209-5](https://doi.org/10.1007/s11269-007-9209-5)
- Louati MH, Benabdallah S, Lebdi F, Milutin D (2011) Application of a genetic algorithm for the optimization of a complex reservoir system in Tunisia. *Water Resour Manag* 25:2387–2404. doi: [10.1007/s11269-011-9814-1](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9814-1)
- MAHRH (2003) Action plan for water resources integrated management (PAGIRE). Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Ouagadougou, Burkina Faso
- Mdemu MV (2008) Water productivity in medium and small reservoirs in the Upper East Region (UER) of Ghana. Ecology and Development Series N° 59
- Mdemu MV, Rodgers C, Vlek PLG, Borgadi JJ (2009) Water productivity (WP) in reservoir irrigated schemes in the upper east region (UER) of Ghana. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 34:324–328. doi: [10.1016/j.pce.2008.08.006](https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.08.006)

- Momtahn S, Dariane AB (2007) Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies. *J Water Resour Plan Manag* 133:202–209
- Moradi-Jalal M, Bozorg Haddad O, Karney BW, Mariño MA (2007) Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Agric Water Manag* 90:149–159. doi:10.1016/j.agwat.2007.02.013
- Noori M, Othman F, Sharifi MB, Heydari M (2013) Multiobjective operation optimization of reservoirs using genetic algorithm (Case Study: Ostoos and Pirtaghi Reservoirs in Ghezel Ozan Watershed). *Int Proc Chem Biol Environ Eng* 51:49–54. doi:10.7763/IPCBE
- Nouiri I (2014) Multi-objective tool to optimize the water resources management using genetic algorithm and the Pareto optimality concept. *Water Resour Manag* 28:1–17. doi:10.1007/s11269-014-0643-x
- Odada OE (2006) Freshwater resources of Africa: major issues and priorities. *Glob Water News GWSP* 3:1–12
- Owor M, Taylor R, Mukwaya C (2011) Groundwater / surface-water interactions on deeply weathered surfaces of low relief: evidence from Lakes Victoria and Kyoga, Uganda. *Hydrogeol J* 19:1403–1420. doi:10.1007/s10040-011-0779-1
- Pabiot F (1999) Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride: Projet MERGUSIE. Mémoire fin d'étude, ENSA Rennes (France), IRD (France) et IRESA (Tunisie)
- Pilpayeh A, Jahromi HM, Raoof M (2010) Optimization of multipurpose serial reservoir systems operation in deluge, normal rainfall, and drought conditions (A case study of Aras River Basin, Iran). *J Food Agric Environ* 8:1004–1009
- Playán E, Mateos L (2006) Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric Water Manag* 80:100–116. doi:10.1016/j.agwat.2005.07.007
- Rani D, Madalena M (2010) Simulation – optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resour Manag* 24:1107–1138. doi:10.1007/s11269-009-9488-0
- Rao NH, Sarma PBS, Chander S (1988) Irrigation scheduling under a limited water supply. *Agric Water Manag* 15:165–175
- Reddy JM, Kumar ND (2006) Optimal reservoir operation using multi-objective evolutionary algorithm. *Water Resour Manag* 20:861–878. doi:10.1007/s11269-005-9011-1
- Regulwar DG, Kamodkar RU (2010) Derivation of multipurpose single reservoir release policies with fuzzy constraints. *J Water Resour Prot* 2:1030–1041. doi:10.4236/jwarp.2010.21213
- Rezapour Tabari MM, Soltani J (2013) Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. *Water Resour Manag* 27:37–53. doi:10.1007/s11269-012-0153-7
- Safavi HR, Darzi F, Mariño MA (2010) Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater. *Water Resour Manag* 24:1965–1988. doi:10.1007/s11269-009-9533-z
- Safavi HR, Esmikhani M (2013) Conjunctive use of surface water and groundwater: application of support vector MACHINES (SVMs) and genetic algorithms. *Water Resour Manag* 27:2623–2644. doi:10.1007/s11269-013-0307-2
- Singh A (2012) An overview of the optimization modelling applications. *J Hydrol* 466–467:167–182. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.08.004
- Some L, Dembele Y, Ouedraogo M, et al. (2006) Analysis of crop water use and soil water balance in Burkina Faso using CROPWAT. CEEPA Discuss. Pap. n°36. CEEPA, University of Pretoria, University of Pretoria
- Suiadee W, Tingsanchali T (2007) A combined simulation – genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: a case study of the Nam Oon Irrigation Project, Thailand. *Hydrol Process* 21:3211–3225. doi:10.1002/hyp
- Tendai S (2005) Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using Geographical Information Systems (GIS) and remotely sensed surface areas: A case of Mzingwane catchment
- Tran L, Schilizzi S, Chalak M, Kingwell R (2011a) Managing multiple-use resources: Optimizing reservoir water use for irrigation and fisheries. 55th Annual AARES National Conference, Melbourne, Victoria
- Tran LD, Schilizzi S, Chalak M, Kingwell R (2011b) Optimizing competitive uses of water for irrigation and fisheries. *Agric Water Manag* 101:42–51. doi:10.1016/j.agwat.2011.08.025
- Tuong TP, Bouman BAM (2003) Rice production in water-scarce environments. In: Kijne JW, Barker R, Molden D (eds) *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*. CABI, Wallingford, pp 53–67
- UNEP (2002) State of the environment and policy retrospective: 1972–2002. In: *Global environment outlook 3: Past, present and future retrospectives*, pp 150–179
- USBR and USDA (2001) *Water measurement manual*. A water research technical Publication, Third Edit. 317
- Venot J, Cecchi P (2011) Valeurs d'usage ou performances techniques: comment apprécier le rôle des petits barrages en Afrique subsaharienne? *Cah Agric* 20:112–117
- Venot J, Krishnan J (2011) Discursive framing: debates over small reservoirs in the rural. *Water Altern* 4:316–324
- Villholth KG (2013) Groundwater irrigation for smallholders in Sub-Saharan Africa – a synthesis of current knowledge to guide sustainable outcomes. *Water Int* 38:369–391. doi:10.1080/02508060.2013.821644

- Wang K, Chang L, Chang F (2011) Multi-tier interactive genetic algorithms for the optimization of long-term reservoir operation. *Adv Water Resour* 34:1343–1351. doi:[10.1016/j.advwatres.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.07.004)
- Yang C-C, Chang L-C, Chen C-S, Yeh M-S (2009) Multi-objective planning for conjunctive use of surface and subsurface water using genetic algorithm and dynamics programming. *Water Resour Manag* 23:417–437. doi:[10.1007/s11269-008-9281-5](https://doi.org/10.1007/s11269-008-9281-5)
- Yang K, Zheng J, Yang M et al (2013) Adaptive genetic algorithm for daily optimal operation of cascade reservoirs and its improvement strategy. *Water Resour Manag* 27:4209–4235. doi:[10.1007/s11269-013-0403-3](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0403-3)
- Yeh WW-G (1985) Reservoir management and operations models. *Water Resour Res* 21:1797–1818
- Zahraie B, Hosseini SM (2009) Development of reservoir operation policies considering variable agricultural water demands. *Expert Syst Appl* 36:4980–4987. doi:[10.1016/j.eswa.2008.06.135](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.135)