



**GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN CONTEXTE DE  
CHANGEMENT CLIMATIQUE : CAS DES BARRAGES DE ZIGA ET  
LOUMBILA (BURKINA FASO)**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
MASTER

**Option : Génie de l'Eau, de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-agricoles  
(GEAAH)**

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 01 février 2022 par

**Gnon Kanni SABI BOU (20150218)**

Sous la direction de :

**Pr Harouna KARAMBIRI**, Professeur Titulaire, Enseignant-chercheur, Institut 2iE ; et  
**Dr FOWE TAZEN**, Maître-Assistant, Enseignant-chercheur, Institut 2iE

Et sous l'encadrement de **M. Namwinwelbere DABIRE** et **M. Alligouamé Vincent  
OUEDRAOGO**, Ingénieurs hydrologues DEIE/DGRE

**Jury d'évaluation**

Président : Pr. Harinaivo A. **ANDRIANISA**

Examineurs : Dr. Cheick Oumar **ZOURE**

M. Gnenakantanhan **COULIBALY**

Promotion [2021-2022]

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## DÉDICACES

Je dédie ce travail à :

- mes parents, pour l'éducation, le soutien et l'amour dont ils m'ont toujours comblé ;
- Mme Nassifatou TIAMIOU et son mari Abdel Fataye ABDOU MAHAMANE, pour avoir toujours été présents dans mes moments de joie comme dans mes périodes difficiles.

Puisse le Tout Puissant les bénir et le leur rendre au centuple.

**CITATIONS**

La force de l'eau vient de la source.

**Persan.**

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

## REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans l'aide et le soutien de toutes ces personnes physiques et morales de près et de loin. L'occasion nous est donc offerte de leur témoigner notre gratitude et reconnaissance à travers ces lignes. Nos remerciements vont particulièrement à l'endroit de :

- ❖ Pr El Hadji Bamba DIAW, Directeur de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et l'ensemble du corps professoral pour la qualité de la formation ;
- ❖ Pr Harouna KARAMBIRI, Directeur de la recherche de 2iE, pour m'avoir permis de faire ce stage sous sa supervision ;
- ❖ Dr FOWE TAZEN, Enseignant-chercheur à 2iE, pour le temps qu'il m'a accordé, ses conseils, guides et accompagnements tout au long du stage ;
- ❖ M. Serge Modeste D. TRAORE, Directeur de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), pour m'avoir reçu dans sa structure ;
- ❖ M. Soumahila SAKANDE, Chef de département hydrologie de la Direction des Études des Informations sur l'Eau (DEIE) ;
- ❖ M. Namwinwelbere DABIRE et M. Alligouamé Vincent OUEDRAOGO, Ingénieurs de la DEIE, pour le thème de recherche, leurs conseils et accompagnements ;
- ❖ les membres du jury dont Pr. Harinaivo A. **ANDRIANISA**, Dr. Cheick Oumar **ZOURE** et M. Gnenakantanhan **COULIBALY** pour le temps accordé à l'évaluation et l'amélioration de ce document. ;
- ❖ la Direction du Développement et de la Coopération Suisse (DDC), pour m'avoir accordé une bourse d'étude pour mon cycle d'ingénierie ;
- ❖ mes camarades et amis pour la collaboration, l'entraide et les moments partagés ensemble.

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## RÉSUMÉ

Les épisodes de sécheresse des années 70 à 80, marqué par une baisse drastique de la pluviométrie moyenne d'environ 200 mm ont démontré la nécessité d'une gestion rigoureuse des ressources en eau dans les pays au sud du Sahara. Pour remédier aux problèmes d'eau potable engendrés, l'État burkinabè a opté pour la construction des retenues d'eau. Ainsi, les barrages de Ziga et Loumbila ont été construits avec pour principal but d'alimenter la ville de Ouagadougou en eau potable. Malgré tous ces efforts, des pénuries d'eau sont toujours observées dans certaines zones de la ville.

Notre étude vise à évaluer la capacité de ces deux barrages à satisfaire les besoins en eau des populations à l'horizon 2050. L'atteinte de cet objectif a nécessité l'utilisation d'un modèle d'allocation et de planification de l'eau (modèle WEAP) afin de prendre en compte différents scénarii d'évolution socio-économique, climatique et de dégradation des ouvrages. L'approche méthodologique est basée d'abord sur la caractérisation des bassins versants et l'analyse des données hydro-pluviométriques à l'aide du logiciel KhronoStat sur la période de 1980 à 2018. Ensuite, les lacunes dans la chronique de données de débits aux niveau du barrage de Ziga ont été corrigées par le modèle GR4J.

Les résultats ont montré que les bassins versants sont tous de formes allongées ( $KG[Ziga] = 2,04$  ;  $KG[Loumbila] = 1,79$ ) ; leurs pentes faibles (0,24 % et 0,19 %) pourraient occasionner de faibles débits d'écoulements. Dans les séries chronologiques, une période de rupture a été détectée en 2002, caractérisée par une tendance à la hausse des précipitations. Par ailleurs, l'application de la formule de GOTTSHALK montre que les deux retenues perdront 50 % de leurs capacités d'ici 2050. Les résultats des simulations avec WEAP montrent que le barrage de Loumbila est plus menacé par les pressions anthropiques. La combinaison des scénarii d'évolution accentue l'insatisfaction des besoins avec un déficit moyen de  $128 \text{ Mm}^3$  pour le RCP4.5 et  $105 \text{ Mm}^3$  pour le RCP8.5 dans l'année la plus défavorable. Les scénarii d'amélioration n'ont pas permis d'atteindre un équilibre entre l'offre et la demande accrue des populations.

Bien que nos résultats présentent la situation future (horizon 2050) des barrages de Ziga et Loumbila, il serait intéressant que d'autres modèles (SWAT ou Mike Hydro Bassin) soient utilisés pour simuler la performance des retenus à l'horizon 2050. Néanmoins, les résultats présentés pourraient constituer un guide pour les gestionnaires et planificateurs des ressources en eau de la ville de Ouagadougou

### Mots Clés :

- 1 – Changement climatique
- 2– Croissance démographique
- 3– GIRE
- 4 – GR4J
- 5 – WEAP

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## ABSTRACT

The drought episodes of the 1970s to 1980s, marked by a drastic drop of about 200 mm in average rainfall have demonstrated the necessity of a rigorous management of water resources in the sub-Saharan countries. To remedy the drinking water problems caused, the Burkinabè State has opted for the construction of artificial water reservoirs. Thus, the Ziga and Loumbila dams were built with the main aim of supplying the city of Ouagadougou with drinking water. However, water shortages are still observed in some areas of the city.

Our study aims to assess the capacity of these two dams to meet the water needs of the populations by 2050. Achieving this objective required the use of a water allocation and planning model (WEAP model) in order to take into account different socio-economic and climatic evolution scenarios and structural degradation. The methodological approach is based firstly on the characterization of the watersheds and the analysis of hydro-pluviometric data with KhronoStat software over the period from 1980 to 2018. Secondly, the incomplete flow data at the Ziga dam was corrected by using the GR4J model.

The results have shown that the watersheds are all elongated in shape ( $KG[Ziga] = 2.04$ ,  $KG[Loumbila] = 1.79$ ) ; their low slope (0.24 % et 0.19 %) could cause low flow rates. In the time series, a period of rupture was detected in 2002, characterized by an increasing trend in precipitation. In addition, the application of the GOTTSHALK formula shows that the two reservoirs will lose 50% of their capacities by 2050. The results of simulations with WEAP show that the Loumbila dam is more threatened by anthropogenic pressures. The combination of development scenarios accentuates the dissatisfaction of needs with an average deficit of  $128 \text{ Mm}^3$  with RCP4.5 and  $105 \text{ Mm}^3$  for RCP8.5. The improvement scenarios did not make it possible to achieve a balance between the supply and the increased demand of the populations.

Although our results present the future situation (horizon 2050) of the Ziga and Loumbila dams, it would be interesting if other models (SWAT or Mike Hydro basin) were used to simulate the performance of the reservoirs by 2050. However, these results could constitute a guide for the managers and water resources planners of the city of Ouagadougou.

### Keywords:

- 1- Climate change
- 2- GR4J
- 3- IWRM
- 4- Population growth
- 5- WEAP

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AEP	: Approvisionnement en Eau Potable
AMMA	: Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
BB	: Besoin Brut
BN	: Besoin Net
DEIE	: Direction des Études et des Informations sur l'Eau
DGRE	: Direction Générale des Ressources en Eau
FAO	: Food and Agriculture Organization
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
INSD	: Institut National de la Statistique et de la Démographie
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
MAE	: Mean Absolute Error
MBE	: Mean Bias Error
Mm <sup>3</sup>	: Million de mètre cube
ONEA	: Office National de l'Eau et de l'Assainissement
PAGIRE	Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
RCP	: Representative Concentration Pathways
RMSE	: Root Mean Square Error
SEI	: Stockholm Environment Institute
SIG	: Système d'Information Géographique
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
WEAP	: Water Evaluation And Planning System

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES .....	i
CITATIONS .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT .....	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	vi
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
LISTE DES FIGURES .....	xii
I. INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
I.1. Contexte et problématique .....	1
I.2. Objectif de l'étude et hypothèses .....	2
I.2.1. Objectif de l'étude.....	2
I.2.2. Hypothèses .....	2
I.3. Structuration du mémoire.....	3
II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....	4
II.1. Présentation de la structure d'accueil .....	4
II.2. Ouvrages de mobilisation des ressources en eau au Burkina Faso .....	5
II.3. Évolution du climat en Afrique de l'Ouest et au Burkina Faso .....	5
II.4. Impact du changement climatique sur les ressources en eau .....	6
II.5. Stratégies développées pour une meilleure gestion des conflits liés à l'eau.....	6
II.6. État des lieux des ouvrages étudiés.....	7
II.6.1. Historique des barrages de Ziga et de Loubila .....	7
II.6.2. Caractéristiques physiques des barrages .....	8
II.6.3. Gestion des barrages étudiés.....	8
II.6.4. Inventaire des modèles existants pour la modélisation des ressources en eau.....	9
III. MATERIEL ET METHODES .....	12
III.1. Présentation de la zone d'étude .....	12
III.1.1. Cadre physique .....	12
III.1.1.1. Situation géographique de la zone d'étude .....	12
III.1.1.2. Climat et pluviométrie de la zone d'étude .....	13
III.1.1.3. Pédologie de la zone d'étude.....	13
III.1.1.4. Végétation de la zone d'étude .....	15

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

III.1.1.5. Géologie et hydrogéologie .....	15
III.1.2. Cadre socio-économique .....	16
III.1.2.1. Démographies et sociologies .....	16
III.1.2.2. Activités économiques .....	17
III.2. Données et outils utilisés .....	17
III.2.1. Données utilisées .....	17
III.2.1.1. Données hydrologiques .....	17
III.2.1.2. Données climatiques .....	18
III.2.1.3. Données socio-économiques .....	20
III.2.2. Outils utilisés .....	21
III.2.2.1. Outil SIG .....	21
III.2.2.2. KhronoStat .....	21
III.2.2.3. CropWat .....	21
III.2.2.4. RStudio .....	21
III.2.2.5. WEAP .....	22
III.3. Méthodologie .....	23
III.3.1. Caractéristiques hydro-morphométriques des bassins versants .....	23
III.3.2. Analyse prospective sur la capacité des barrages de Ziga et Loumbila à satisfaire les besoins des populations .....	23
III.3.2.1. Analyse des données hydro-pluviométriques .....	23
III.3.2.1.1. Critique des données .....	23
III.3.2.1.2. Exécution du modèle GR4J .....	24
III.3.2.1.3. Analyse de l'homogénéité des séries de données pluviométriques .....	24
III.3.3. Modélisation de l'allocation de l'eau avec WEAP .....	25
III.3.3.1. Élaboration du schéma conceptuel du domaine d'étude .....	25
III.3.3.2. Définition des paramètres généraux .....	26
III.3.3.3. Modélisation de l'allocation de l'eau .....	26
III.3.3.3.1. Sources d'approvisionnement .....	26
III.3.3.3.2. Usages et demandes en eau .....	27

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

III.3.3.4. Définition des règles de priorité au niveau de l’approvisionnement en eau .	29
III.3.3.5. Calibration du modèle WEAP.....	29
III.3.3.6. Analyse prospective : élaboration des scénarios .....	30
III.3.3.6.1. Analyse de la situation de référence (scénario de référence) .....	30
III.3.3.6.2. Augmentation de la population .....	31
III.3.3.6.3. Augmentation des périmètres irrigués.....	31
III.3.3.6.4. Scénario d’encombrement des retenues d’eau .....	31
III.3.3.6.5. Prise en compte du changement climatique .....	32
III.3.3.7. Proposition de stratégies pour une gestion durable des retenues d’eau de Ziga et Loumbila .....	33
III.3.3.7.1. Utilisation des spéculations moins exigeantes en eau .....	33
III.3.3.7.2. Suppression de tous les sites de demande hormis l’AEP .....	33
III.3.3.8. Schéma synoptique du fonctionnement du logiciel WEAP .....	34
IV. RESULTATS ET DISCUSSION .....	35
IV.1. Caractérisations morphologiques du bassin versant.....	35
IV.2. Analyse des données pluviométriques .....	36
IV.2.1. Analyse de l’homogénéité des données pluviométriques.....	36
IV.2.2. Analyse de la tendance climatique .....	37
IV.3. Calibration du modèle WEAP.....	38
IV.3.1. Comparaison des volumes observés et simulés au niveau des retenues d’eau.....	38
IV.3.2. Appréciation de la performance de WEAP .....	39
IV.4. Evaluation de l’équilibre entre l’offre et la demande en eau pour l’année de base.....	39
IV.4.1. Demandes en eau des différents usagers .....	39
IV.4.2. Satisfaction des besoins en eau des différents usagers.....	40
IV.5. Analyse des résultats des scénarii .....	41
IV.5.1. Scénario de référence .....	41
IV.5.2. Scénario d’augmentation de la population .....	43
IV.5.3. Scénario d’augmentation des surfaces irriguées .....	45
IV.5.4. Scénario de diminution de la capacité des retenues .....	45
IV.5.5. Scénario de changement climatique .....	48
IV.5.6. Combinaison des scénarii.....	50

# **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

IV.6. Proposition de stratégies pour une gestion durable des retenues d'eau de Ziga et Loumbila ..	53
IV.6.1. Utilisation des spéculations moins exigeantes en eau .....	53
IV.6.2. Suppression de tous les sites de demandes hormis l'AEP.....	53
V. CONCLUSION .....	55
PERSPECTIVES / RECOMMANDATIONS.....	56
BIBLIOGRAPHIE .....	57
LISTE DES ANNEXES .....	60
ANNEXES .....	61

**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des retenues de Loumbila et Ziga .....	8
Tableau 2 : Inventaire des modèles de simulation (Alvarez et al., 2014 ; Bangash et al., 2012 ; Droogers et al., 2011 ; Socle, 2010) .....	11
Tableau 3 : Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de l'étude.....	20
Tableau 4 : Classification de la sécheresse en fonction de l'indice de Nicholson .....	25
Tableau 5 : Effectif du bétail.....	28
Tableau 6 : Projection de la population à l'horizon 2050 .....	31
Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant .....	35
Tableau 8 : Résultats du test de Pettitt .....	36
Tableau 9 : Synthèse des résultats du calage et de validation du modèle .....	39

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	12
Figure 2 : Pluviométrie de la zone d'étude .....	13
Figure 3 : Pédologie du bassin versant.....	14
Figure 4 : Végétation du bassin versant .....	15
Figure 5 : Géologie du bassin versant .....	16
Figure 6 : Variation du stock d'eau dans les barrages de Ziga et Loumbila (2000 - 2018).....	17
Figure 7 : Variation des débits sur la période de 2000 à 2018 .....	18
Figure 8 : Variation de la pluviométrie observée (1980 à 2018) et future (2019 à 2050).....	19
Figure 9 : Variation de la température sur la période de 1980 à 2017 .....	19
Figure 10 : Évapotranspiration observées sur la période de 1980 à 2017.....	20
Figure 11 : Schéma conceptuel du modèle WEAP .....	26
Figure 12 : Zones de fonctionnement d'un réservoir (Source :WEAP).....	27
Figure 13 : Schéma de principe du modèle WEAP.....	34
Figure 14 : Courbes hypsométriques des bassins versants des barrages étudiés .....	36
Figure 15 : Indices standardisés de pluie observés (1980 à 2018) et issus des scénarii RCP4.5 et RCP8.5 .....	37
Figure 16 : Courbes de calage et validation du modèle WEAP.....	38
Figure 17 : Demande en eau au tour du barrage de Loumbila en 2018 .....	40

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Satisfaction des besoins en eau en 2018 (barrage de Ziga).....	40
Graphique 2 : Taux de satisfaction des besoins sur le compte actuel Loumbila.....	41
Graphique 3 : Taux de satisfaction des besoins autour du barrage de Ziga dans le scénario de référence .....	42
Graphique 4 : Taux de satisfaction des besoins autour du barrage de Scénario de référence..	43
Graphique 5 : Taux de satisfaction avec l'augmentation de la population (Barrage de Ziga)..	44
Graphique 6 : demande non satisfaite avec l'augmentation de la population (Barrage de Loumbila).....	45
Graphique 7 : demande non satisfaite avec l'augmentation des périmètres irrigués (Barrage de Loumbila).....	45
Graphique 8 : : Taux de satisfaction avec la diminution de la capacité (Barrage de Ziga).....	46
Graphique 9 : Taux de satisfaction des besoins avec la diminution de la capacité de la retenue (Loumbila).....	47
Graphique 10 : Taux de satisfaction des besoins en eau avec les effets du changement climatique (Barrage de Ziga) .....	48
Graphique 11 : Taux de satisfaction des besoins en eau avec les effets du changement climatique (Barrage de Loumbila) .....	50
Graphique 12 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii et le RCP4.5 (barrage de Ziga) .....	51
Graphique 13 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii et le RCP8.5 (barrage de Ziga) .....	51
Graphique 14 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii ( barrage de Loumbila) .....	52
Graphique 15 : Couverture des besoins en eau avec l'utilisation des cultures moins consommatrices d'eau.....	53
Graphique 16 : Couverture des besoins en eau avec suppression des autres sites de demandes (barrage de Ziga).....	54

**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

Graphique 17 : Couverture des besoins en eau avec suppression des autres sites de demandes (barrage de Loumbila)..... 54

# **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

## **I. INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### **I.1. Contexte et problématique**

L'accès à l'eau pour tous est un droit impératif social (Fauquez-Avon, 2006). Malgré la propagation de ce message par nombreux de nos autorités, l'accès à l'eau des populations demeure un défi à relever surtout dans les pays sahéliens. Le Burkina Faso, faisant partie de cette zone sahélienne, n'est pas en marge de ces difficultés. En effet, la faible pluviosité, la forte variabilité des précipitations d'une année à une autre, d'une saison à une autre. Aussi les épisodes de sécheresse depuis les années 70 ont contribué à aggraver l'accès à l'eau au Burkina Faso (Touré et al., 2015). À cela s'ajoute la nature des roches (essentiellement cristallines) ne favorisant pas l'alimentation des nappes phréatiques ; ce qui implique de faibles débits de la plupart des forages avec en moyenne 2 m<sup>3</sup>/h (MEE, 2001). Ces débits sont insuffisants pour satisfaire les besoins en eau des populations. Par conséquent, elles n'ont d'autre recours que les eaux de surface impliquant les risques de pollutions du point de vue qualité physico-chimique et bactériologique ainsi que les coûts élevés de mobilisation et de traitement. Aussi, notons que, le changement climatique joue un rôle important dans la disponibilité de la ressource et affecte les activités socio-économiques (élevage, agriculture, pêche et industrie) tributaires de la ressource en eau. En ce qui concerne l'agriculture, elle est essentiellement pluviale, constitue la principale activité des populations rurales et contribue à presque 40 % du PIB de ce pays (MAHRH, 2011).

Par ailleurs, le Burkina Faso est subdivisé en quatre grands bassins hydrographiques nationaux : Nakanbé, Mouhoun, Comoé et Niger. Le bassin du Nakanbé dispose de la majorité des retenues d'eau et les plus grands barrages du Burkina (DGRE, 2017). On peut citer entre autres : les barrages de Loumbila, Bagré, Kompienga, Ziga, et Toécé (Kanazoé). La ville de Ouagadougou est alimentée en eau potable à partir des barrages situés dans ce bassin. D'une population d'environ 60 milles habitants en 1960, la ville de Ouagadougou passe à environ 2,5 millions habitants en 2019 (INSD, 2020). Cette croissance démographique galopante fait accroître exponentiellement la demande en eau potable de la ville. Initialement, l'office national de l'eau exploitait la retenue d'eau n°3 de Ouagadougou et surtout celle de Loumbila pour alimenter la ville de Ouagadougou en eau potable. Cependant, à cause des épisodes de sécheresse des décennies 70 et 80, de la perte des capacités des ouvrages et de la hausse de la demande en eau, les eaux mobilisées dans ces retenues sont devenues insuffisantes pour satisfaire les besoins en eau des populations (Morel, 1997). Ainsi, l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) a commencé à étudier la possibilité de mobiliser de nouvelles ressources. Le barrage

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

de Ziga d'une capacité de 200 millions de mètres cubes a donc été réalisé. Mais malheureusement, du fait de la forte urbanisation et de la forte évaporation, force est de constater que la ville est constamment confrontée à des périodes de pénuries d'eau. À cette allure l'on se demande quelle sera la situation d'ici 2050 ? La ressource en eau disponible dans les barrages de Ziga et de Loumbila pourra-t-elle répondre aux besoins de la population jusqu'en 2050 ? La capacité des infrastructures de production de l'eau potable pourrait-elle être en mesure de produire la quantité d'eau nécessaire pour les besoins de la population ? C'est dans l'optique de répondre à ces questions que s'inscrit la présente étude dont le thème s'intitule : « Gestion des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : application du modèle weap pour une gestion intégrée des ressources en eau des barrages de Ziga et de Loumbila dans le bassin-versant du Nakanbé (Burkina Faso) ».

### **I.2. Objectif de l'étude et hypothèses**

#### **I.2.1. Objectif de l'étude**

L'objectif général de cette étude est d'évaluer la capacité des barrages de Ziga et de Loumbila à satisfaire l'ensemble des besoins en eau des différents usagers d'ici l'horizon 2050 dans un contexte de croissance démographique et de changement climatique.

Plus spécifiquement, il s'agira de :

- Faire la caractérisation hydro-morphométrique des bassins versants étudiés ;
- Faire une analyse prospective sur la capacité de ces barrages à satisfaire les besoins en eau des populations en fonction des scénarii élaborés ;
- Proposer des stratégies pour une gestion durable de ces barrages-réservoirs.

#### **I.2.2. Hypothèses**

Pour mettre en œuvre ce travail, deux hypothèses ont été élaborées :

**Hypothèse 1 :** « Vu l'évolution du climat et l'augmentation des besoins dues à l'accroissement de la population, les barrages de Ziga et de Loumbila ne pourront plus couvrir les besoins de la population d'ici 2050 ».

**Hypothèse 2 :** « D'ici 2050, sous l'effet de l'ensablement, les barrages de Ziga et de Loumbila pourraient perdre la moitié de leur volume ».

# **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

## **I.3. Structuration du mémoire**

Ce travail est structuré en quatre parties. La première sera consacrée à la revue de la littérature autour de la thématique. Dans la deuxième partie, nous présenterons le matériel et la méthodologie. Au niveau de la troisième partie, nous présenterons les résultats et discussions. La dernière partie sera consacrée à la conclusion.

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

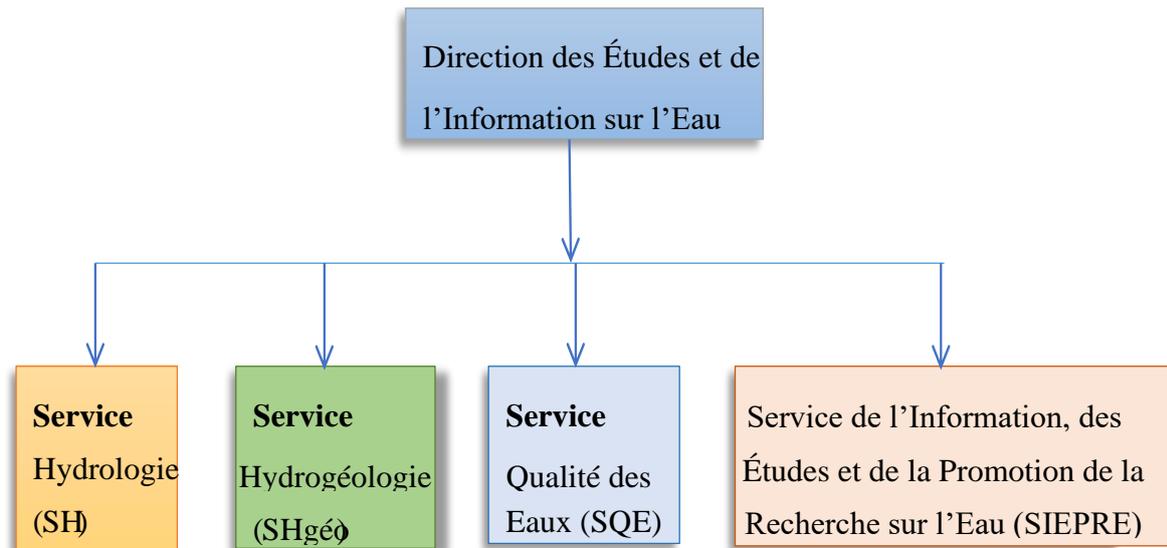
### II.1. Présentation de la structure d'accueil

La Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) est l'une des directions générales du Ministre en charge de l'eau et de l'assainissement. Elle assure le suivi de la ressource en eau (eau de surface ou souterraine), ainsi que la qualité de celle-ci. Elle est composée principalement de deux (02) directions techniques dont la Direction de la Réglementation et du Suivi des Organismes de Bassins Transfrontaliers (DRSOBT) et la Direction des Études et de l'Information sur l'Eau (DEIE).

Notre stage s'est déroulé au sein de la direction des études et de l'information sur l'eau (DEIE) plus précisément dans le service hydrologie. Ce service assure le suivi des eaux de surfaces (cours d'eau, retenue d'eau) ainsi que les études spécifiques dans le sens d'une bonne connaissance des ressources en eau des bassins hydrographiques. Il fonctionnait avec des brigades hydrologues composé d'un technicien supérieur, un aide hydrologique, un ouvrier spécialisé et un chauffeur. Cette brigade assurait le très bon fonctionnement du service en deux (02) phases :

- Phase terrain : cette phase adopte comme processus la mise en place d'enregistreurs (mécaniques, électroniques) sur chaque station pour la collecte des données mensuelles ainsi que leur maintenance avant le début des campagnes (mois de mars), ensuite d'effectuer des jaugeages au cours de la saison pluvieuse au niveau des stations hydrométriques des cours d'eau pour l'évaluation des débits au niveau de ces stations ;
- Phase bureau : elle consiste à centraliser les données, les traitées, les stockées dans la base de données hydromètre G2. Les jaugeages sont dépouillés à l'aide des logiciels hydromètre V2 et TARJAU. Les jaugeages au moyen de l'ADCP permettent actuellement d'obtenir les débits sur les sites ;
- 
- Les données collectées servent au service hydrologie, l'élaboration des informations ou produits de diffusion dont le document de synthèses de suivi des ressources en eau (annuel), le bulletin hydrologique (mensuel), la note hydrologique et l'annuaire hydrologique (chaque deux (02) ans) ;
- Organigramme de la Direction des Études et de l'Information sur l'Eau (DEIE)

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)



### II.2. Ouvrages de mobilisation des ressources en eau au Burkina Faso

La mobilisation des ressources en eau est un facteur primordial dans la satisfaction des besoins en eau (agricoles, domestiques, pastorales et industriels) des populations. Les différents types d'ouvrages de mobilisation dont dispose le Burkina Faso sont : les bas-fonds, les petits barrages, les grands barrages, les puits traditionnels, les puits modernes, les forages (Mei, 2003). Le remplissage de ces ouvrages se fait seulement à travers les eaux de ruissellements et d'infiltration engendrées par les précipitations. Depuis la fin des années 60, le sahel connaît une baisse de la pluviométrie avec des épisodes de forts déficits entre les années 1972-1973 et 1982-1984 (Sircoulon, 1982). Ce déficit a eu un important impact sur les populations, les activités agricoles et sur les niveaux des eaux des barrages et aquifères (Nka, 2016). Ainsi, les ouvrages de mobilisation se retrouvent exposés à l'assèchement au regard du réseau hydrographique majoritairement temporaire, des aquifères déficitaires et de la variation de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace (Mei, 2003).

### II.3. Évolution du climat en Afrique de l'Ouest et au Burkina Faso

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le climat est l'ensemble des conditions météorologiques (température, pressions, humidité) dans une région donnée, caractérisées par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère (Ibrahim, 2012). Au cours des dernières décennies, le climat connaît une variabilité caractérisée par une tendance à la hausse des températures (Doumounia et al., 2020). En effet, en Afrique de l'Ouest, l'augmentation probable de la température moyenne est projetée de l'ordre de 3 à 6 °C à la fin du XXIème siècle (Fowe, 2015). Particulièrement au Burkina Faso, les projections climatiques

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

indiquent une augmentation de la température moyenne de 0,8 °C à l'horizon 2025 et de 1,7 °C à l'horizon 2050 (MECV, 2007). Cette hausse de la température augmente l'évapotranspiration potentielle qui, conjuguée aux diverses activités anthropiques entraîne la dégradation du couvert végétal impliquant ainsi la diminution de la recharge d'eau souterraine. D'autre part, les eaux de surface (barrages et cours d'eaux) sont soumises à de fortes évaporations réduisant donc leur pérennité (Bikienga, 2014).

### **II.4. Impact du changement climatique sur les ressources en eau**

Le changement climatique se définit comme étant une modification des paramètres du climat qui s'effectue à long terme dans une région du globe ou sur la surface de la terre dans son intégralité. Le changement climatique peut être d'origine naturelle ou anthropique. En effet, l'augmentation de la population favorise le développement des activités humaines telles que l'industrie, la déforestation, le transport et l'agriculture qui sont responsables des émissions de la majeure partie des principaux gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et le méthane (CH<sub>4</sub>) (Bouzelha, 2020).

Ainsi, la notion du changement climatique s'associe au réchauffement climatique affectant le cycle de l'eau qui se traduit par la baisse des précipitations, des niveaux piézométriques, des débits d'écoulement des nappes, l'augmentation de l'évapotranspiration (Ducharne et al., 2009), la fonte des calottes polaires et des glaciers. Ce phénomène accentue également les risques de sécheresses, modifiant l'équilibre biologique et chimique de l'eau pouvant aboutir à une mortalité importante de différentes espèces. Dans le cas de l'intensification et de la multiplication des épisodes de pluies extrêmes, le changement climatique augmente le risque d'inondations (Thierry, 2019) augmentant notamment le risque d'érosion et par conséquent détériore les berges des cours et retenues d'eau.

### **II.5. Stratégies développées pour une meilleure gestion des conflits liés à l'eau**

Ces phénomènes évoqués précédemment font la rareté de la ressource en eau au Burkina Faso. Vu la divergence des intérêts (économiques, politiques, sociaux et autres), des situations conflictuelles sont souvent nées entre les usagers de l'eau. Pour cela, la gestion des volumes d'eau disponibles doit être envisagée de façon globale et intégrée en prenant en compte tous les usages de ces ressources à savoir : l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation de terres agricoles, le maraichage, la production industrielle, l'élevage, la pêche, le tourisme, les mines, et la production d'hydroélectricité. Ainsi, des actions doivent être menées à l'image de la GIRE

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

(Gestion Intégrée des Ressources en Eau) qui est un processus favorisant le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux (Karambiri, 2007). La GIRE est donc une approche globale de l'eau à l'échelle du bassin versant en termes d'usage et d'impacts. Au niveau de l'agriculture, pour une meilleure gestion de l'eau, les producteurs ont adopté des techniques de conservation de l'eau telles que les cordons pierreux, le zaï et les demi-lunes (Zouré et al., 2019). Ces pratiques permettent également de maintenir le sol humide sur une longue période. Toujours selon la GIRE, la politique de l'Etat burkinabé repose sur le principe de pollueur-payeur, préleveur-payeur et la participation de tous les acteurs dans le but de remédier aux problèmes actuels et futurs liés à la gestion de l'eau (Ki et al., 2013).

### **II.6. État des lieux des ouvrages étudiés**

#### **II.6.1. Historique des barrages de Ziga et de Loumbila**

##### **❖ Le barrage de Loumbila**

Le barrage de Loumbila a été réalisé en 1947 sur la rivière de Massili (un affluent du Nakanbé) à une quinzaine de kilomètres au Nord-Est de Ouagadougou. En 1970, un nouveau barrage a été construit afin d'augmenter la capacité de la retenue. Elle est alors passée de 32,32 à 36 Mm<sup>3</sup>. Suite au rehaussement du déversoir en 2004, sa capacité est passée à 42,2 Mm<sup>3</sup>. Sa superficie au plan d'eau normal est de 16,8 km<sup>2</sup> pour une profondeur moyenne de 2,15 m. L'objectif de sa réalisation est d'alimenter la ville de Ouagadougou en eau potable. Mais, en dehors de l'alimentation en eau potable de la ville, plusieurs autres activités telles que le maraîchage et la pêche y sont menées. De plus, les entreprises de BTP y prélèvent de l'eau dans le cadre de leurs activités. Toutes ces activités menacent le barrage à l'assèchement si aucune disposition n'est prise (AEN, 2018).

##### **❖ Le barrage de Ziga**

Suite aux sécheresses des années 70 et 80, les barrages de Loumbila et Ouaga n°3 n'arrivaient plus à satisfaire les besoins en eau potable de la population. Après l'étude des retenues d'eau du pays dans le but de trouver une source d'eau complémentaire pour l'alimentation en eau de la ville, seul le barrage de Ziga répondait aux critères de choix. Situé en amont du barrage de Bagré à environ 50 km au nord-est de la ville de Ouagadougou, les travaux de réalisation du barrage de Ziga d'une capacité de 200 Mm<sup>3</sup> ont débuté en mai 1998 et la mise en eau en juillet

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

2000 (Ngom, 2010). Ce projet de réalisation dénommé projet Ziga comporte deux phases dont Ziga I, Ziga II et une phase intermédiaire (Ziga bis). La première phase a permis d'avoir une capacité de traitement de 3000 m<sup>3</sup>/heure et la réalisation des infrastructures telles que les stations de pompage et d'étendre les réseaux secondaires et tertiaires ainsi que la réalisation de 50 000 branchements et 400 bornes fontaines. Cette phase s'est achevée en 2007 et Ziga bis commença en 2008. Lors de cette phase intermédiaire, la capacité de production a été portée à 4500 m<sup>3</sup>/h. La deuxième phase (Ziga II), démarrée en 2014, visait le doublement de la capacité de traitement et d'adduction avec la construction d'une conduite d'adduction supplémentaire et la réalisation d'une nouvelle unité de traitement de 4500 m<sup>3</sup>/h. La densification du système de distribution devrait aboutir à la réalisation de 52 000 nouveaux branchements et 160 bornes fontaines supplémentaires (Reymond, 2016).

### II.6.2. Caractéristiques physiques des barrages

Les caractéristiques physiques des barrages de Ziga et Loumbila ont été synthétisées dans le cadre de cette étude (en 2021) à partir des études de Ngom (2010) et DEIE (2017). Ces caractéristiques présentées au tableau 1 seront utilisées comme données d'entrées dans le modèle WEAP.

**Tableau 1 : Caractéristiques physiques des retenues de Loumbila et Ziga**

Barrages	Capacité (Mm3)	Hauteur digue (m)	Côte plus haute eaux (m)	Hauteur du déversoir (m)	Longueur du déversoir (m)	Côte niveau d'eau normal (m)	Côte minimale (m)	Coordonnées
<b>Ziga</b>	200	18,8	268,8	13,2	120	267,20	261,4	12° 30'N et 1° 05'W
<b>Loumbila</b>	42,2	7,21	278,83	6,4	49	276,83	274	12° 24'N et 01° 24'W

### II.6.3. Gestion des barrages étudiés

Le Burkina Faso, pour mettre en œuvre le Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) a consacré les bassins versants comme entité et espace de gestion des ressources en eau. Ainsi, le territoire a été subdivisé en cinq (05) espaces de gestion : Comoé, Mouhoun, Nakanbé, Liptako et Gourma. Ces espaces correspondent aux bassins versants nationaux du Burkina (Comoé, Mouhoun, Nakanbé et Niger) où le Liptako et le Gourma représentent respectivement le nord et le sud du bassin du Niger. Au sein des bassins

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

versants, la gestion est assurée par les Agences de l'Eau et par les Comités Locaux de l'Eau (CLE) au niveau des sous-bassins (Venot et al., 2014).

Selon cette politique, la gestion des barrages de Loumbila et Ziga est assurée par l'Agence de l'Eau du Nakanbé (AEN) et les CLE mises en place respectivement en 2005 et 2013. En effet, les CLE constituent les cadres les plus proches de la gestion des ressources en eau. Leurs missions sont :

- Rechercher sur un territoire d'application défini en liaison avec les ressources en eau, l'adhésion permanente des acteurs de l'eau (administration, usagers, Collectivités locales, autorités coutumières, organisations de la société civile) à la gestion concertée des ressources en eau par la sensibilisation, l'information, la formation et l'action concrète ;
- Initier ou appuyer au niveau local, les actions de développement, de protection, de promotion et de restauration du domaine public de l'eau ;
- Assurer une coopération d'une part avec les structures semblables (notamment avec les CLE qui ont en partage le même cours d'eau) et d'autre part avec les structures déconcentrées et décentralisées compétentes et les organismes de bassin à l'échelon supérieur.

Au niveau de chaque barrage, l'AEN enregistre les différents utilisateurs de l'eau et a mis en place des panneaux d'avertissement sur l'utilisation anarchique de l'eau.

### **II.6.4. Inventaire des modèles existants pour la modélisation des ressources en eau**

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) revêt une importance croissante en raison de la pénurie d'eau, de la croissance démographique, du changement climatique et de la détérioration de la qualité des ressources. Dans cette partie, nous passons en revue l'examen de quelques modèles existants pour la modélisation des ressources en eau. Deux concepts environnementaux sont pris en compte dans cet examen, la gestion de la quantité et de la qualité de l'eau et la durabilité, étaient les plus fréquemment utilisés dans ces modèles d'allocation révisés.

#### **➤ SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

SWAT est un modèle développé par des chercheurs de l'USDA-Agricultural Research Service, de l'USDA-Natural Resources Conservation Service et de l'Université du Texas A&M. Il a

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

été développé pour évaluer les ressources en eau et prédire les impacts des changements d'utilisation/couverture des terres, des pratiques de gestion des terres sur l'érosion des sols, la sédimentation et la pollution diffuse sur les bassins versants ou les grands bassins fluviaux (Alvarez et al., 2014).

### **➤ Mike Hydro Bassin**

Mike Hydro Bassin est un logiciel développé par l'Institut Hydrologique Danois et est utilisé comme outil d'aide à la décision pour la gestion et la planification intégrées des ressources en eau. Ce logiciel permet une modélisation hydrologique complète pour fournir des solutions à l'échelle du bassin. Il est utilisé pour gérer la distribution de l'eau dans un bassin, ce qui inclut les opérations de réservoirs et d'hydroélectricité, ainsi que les problèmes de qualité de l'eau (Bangash et al., 2012).

### **➤ WEAP (Water Evaluation And Planning System)**

WEAP est un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau. Il a été développé par l'Institut de l'Environnement de Stockholm à l'Institut Tellus de Boston aux États-Unis (Stockholm Environment Institute : SEI) en 1988 (Fowe, 2015). WEAP utilise une approche intégrée permettant de simuler les interactions entre des variables explicatives naturelles (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, etc.) avec des composants d'aménagements (réservoirs, pompage, etc.), permettant d'aboutir à une vision globale de plusieurs facteurs pertinents à la gestion des ressources en eau (Droogers et al., 2011). Les avantages et inconvénients de chaque modèle sont présentés au tableau 2.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

Tableau 2 : Inventaire des modèles de simulation (Alvarez et al., 2014 ; Bangash et al., 2012 ; Droogers et al., 2011 ; Socle, 2010)

Modèles	Avantages	Inconvénients
SWAT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne adéquation pour la prévision hydrologique de la sécheresse en Afrique ;</li> <li>- Capacité à être appliquée de manière plus simple avec peu de paramètres ;</li> <li>- Bonne simulation des débits dans les bassins versants ;</li> <li>- Convient aux applications à grande échelle et est facilement applicable dans les zones où les données sont rares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exigences élevées en matière de données ;</li> <li>- Limites du modèle ;</li> <li>- Nécessité de données suffisantes et précises pour calibrer et valider le débit et la dynamique des sédiments ;</li> <li>- Sous-estimation du ruissellement</li> </ul>
MIKE HYDRO bassin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible temps de calcul ;</li> <li>- Faible besoin en données ;</li> <li>- Faible coût ;</li> <li>- Précis dans la modélisation des cours d'eau naturels de grande taille et non complexes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvaise efficacité dans un système fluvial et une topographie complexe ;</li> <li>- Mauvaise efficacité dans des canaux artificiels complexes ;</li> <li>- Défaut de fourniture d'informations détaillées</li> </ul>
WEAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicable dans plusieurs domaines (agricole, municipal...);</li> <li>- Evaluation en terme de quantité, qualité et coût ;</li> <li>- Accessibilité ;</li> <li>- Disponibilité des données d'entrées ;</li> <li>- Simple à manipuler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exigences élevées en matière de données ;</li> <li>- Nécessité de données suffisantes et précises pour calibrer et valider les réservoirs.</li> </ul>

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

## III. MATERIEL ET METHODES

### III.1. Présentation de la zone d'étude

#### III.1.1. Cadre physique

##### III.1.1.1. Situation géographique de la zone d'étude

Les deux barrages concernés par cette étude sont situés dans le Nakanbé moyen. Le sous bassin versant prenant en compte ces barrages est compris entre  $0^{\circ}44'13''$  et  $2^{\circ}39'57''$  de longitude Ouest et  $12^{\circ}0'14''$  et  $14^{\circ}4'40''$  de latitude nord (**Figure 1**). Il couvre une superficie de  $25\,820\text{ km}^2$  et enregistre au moins quatre grands barrages à savoir : Ziga, Dourou, Guitti et Loubila. Ce bassin s'étend sur quatorze provinces qui sont : Gouzourgou, Oubritenga, Bazega, Kadiogo, Kourweogo, Passore, Sanmatenga, Namentenga, Sourou, Zondoma, Yatenga, Loroum, Soum et Bam.

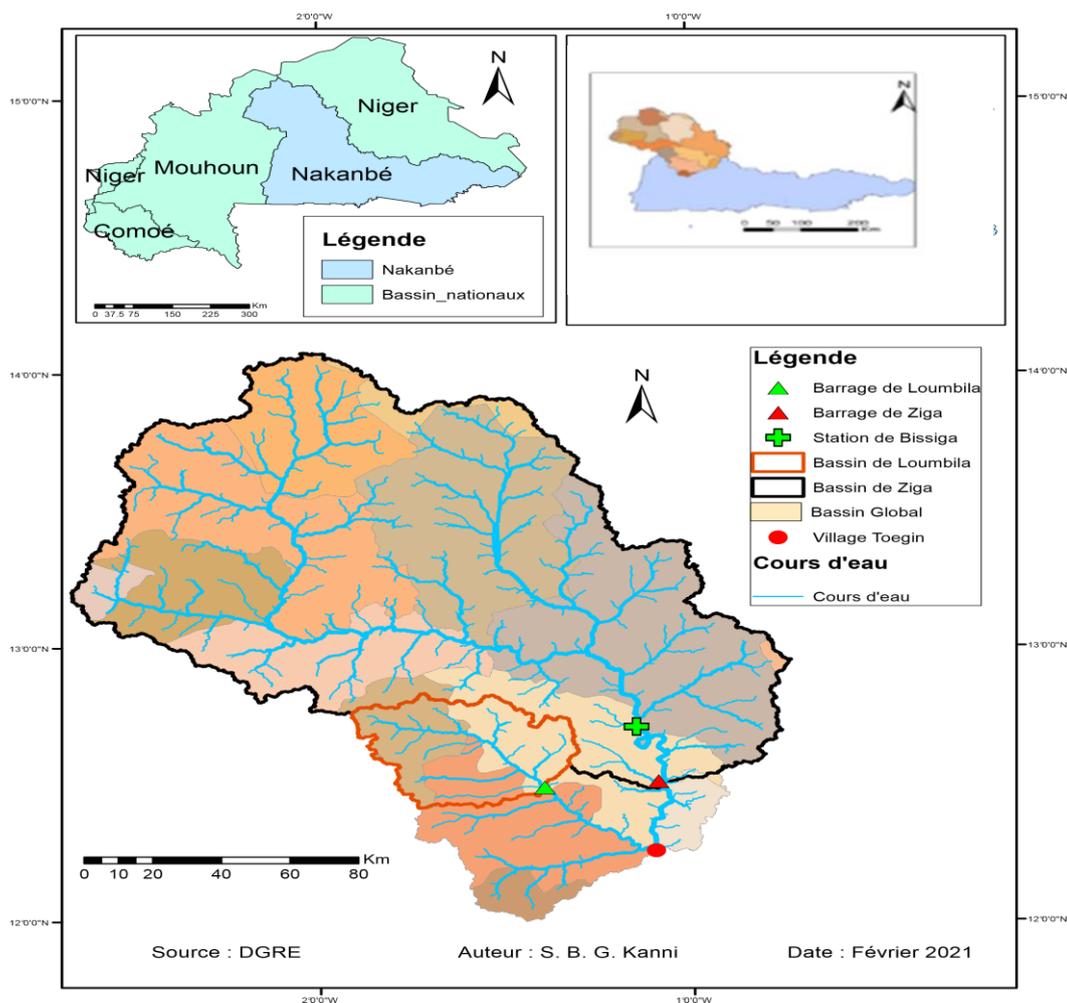


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## III.1.1.2. Climat et pluviométrie de la zone d'étude

La figure 2 met en exergue les différentes zones climatiques de la zone d'étude. Parmi les paramètres du climat (pluie, température, vents, l'ensoleillement, l'humidité), la pluie constitue le paramètre marquant le climat semi-aride du bassin du Nakanbé. En effet, la pluie varie d'une saison à une autre et d'une année à une autre. On distingue deux saisons à l'échelle saisonnière : une saison pluvieuse (juin à octobre) et une saison sèche (novembre à mai). Selon la répartition spatiale de la pluviométrie, deux zones climatiques se distinguent à savoir : sud-sahélien [400-600] et la zone nord soudanienne (600-800 mm) (DGRE, 2017).

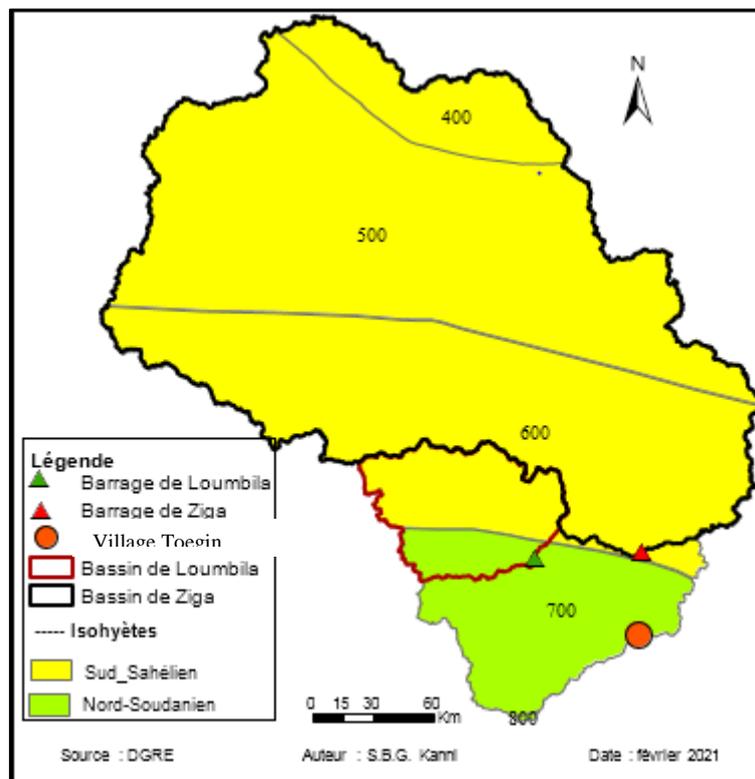


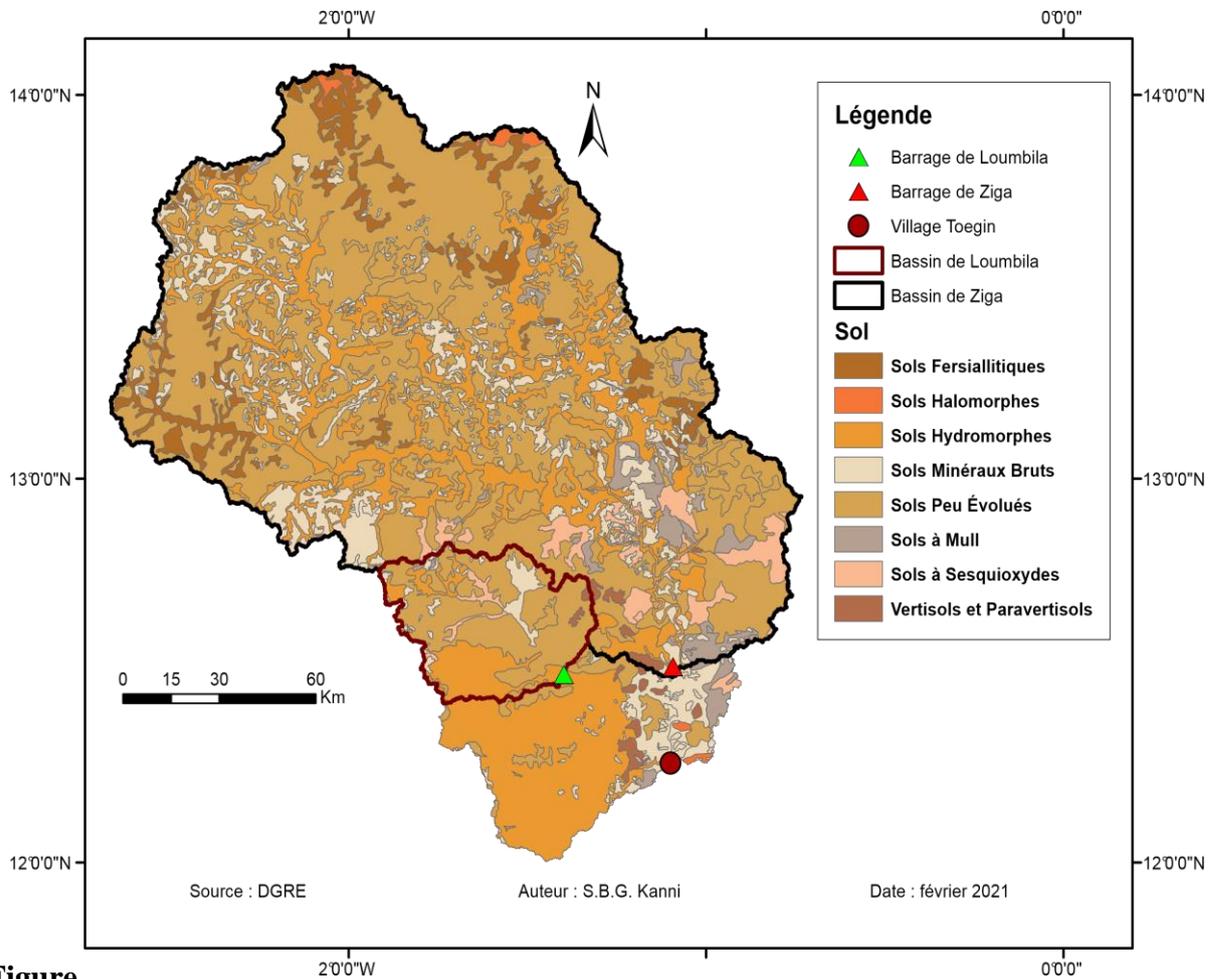
Figure 2 : Pluviométrie de la zone d'étude

## III.1.1.3. Pédologie de la zone d'étude

La figure 3 présente les types de sol rencontrés dans la zone d'étude. Les paramètres hydrométéorologiques du bassin versant sont influencés de façon directe par le relief. En effet, nombreux de ces paramètres varient avec l'altitude. Le Nakanbé présente une diversité de sol en relation avec les régimes de drainages, le substrat géologique et les apports éoliens. Dans la zone méridionale se retrouvent des sols à paysage verticale. On distingue les principaux types de sols suivants : les sols à minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols à sesquioxyde de fer,

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

les sols halomorphes, les sols hydromorphes (qui se rencontrent le long des axes de drainage et les plaines alluviales contigües), les vertisols, les sols bruns eutrophes (Diallo, 2014).



Figure

3 : Pédologie du bassin versant

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## III.1.1.4. Végétation de la zone d'étude

La figure 4 présente la végétation de la zone d'étude. Il faut noter que le bassin du Nakanbé est caractérisé par une végétation assez variée. La zone sahélienne du bassin est caractérisée par une steppe herbeuse, arbustive et une savane arborée. Les steppes herbeuse et arbustive sont dominées par les espèces : *Guiera Senegalensis* (*Guiéra*), *combretum spp*, *Acacia spp*, *Cenchrus biflorus*, *Combretum glutinosum*, et *Balanites a egyptiaca*. La savane arborée est dominée par *Lannea microcarpa*. La zone nord soudanienne du bassin est caractérisée par une savane arborée et arbusive dominée par les espèces *Anogeisus leiocarpus*, *combretum* et *Butyrospermum parkii*. On note une formation mixte des vallées associées aux cultures (*Parcs* à *Butyrospermum parkii* et *Acacia albida*) (Diallo, 2014).

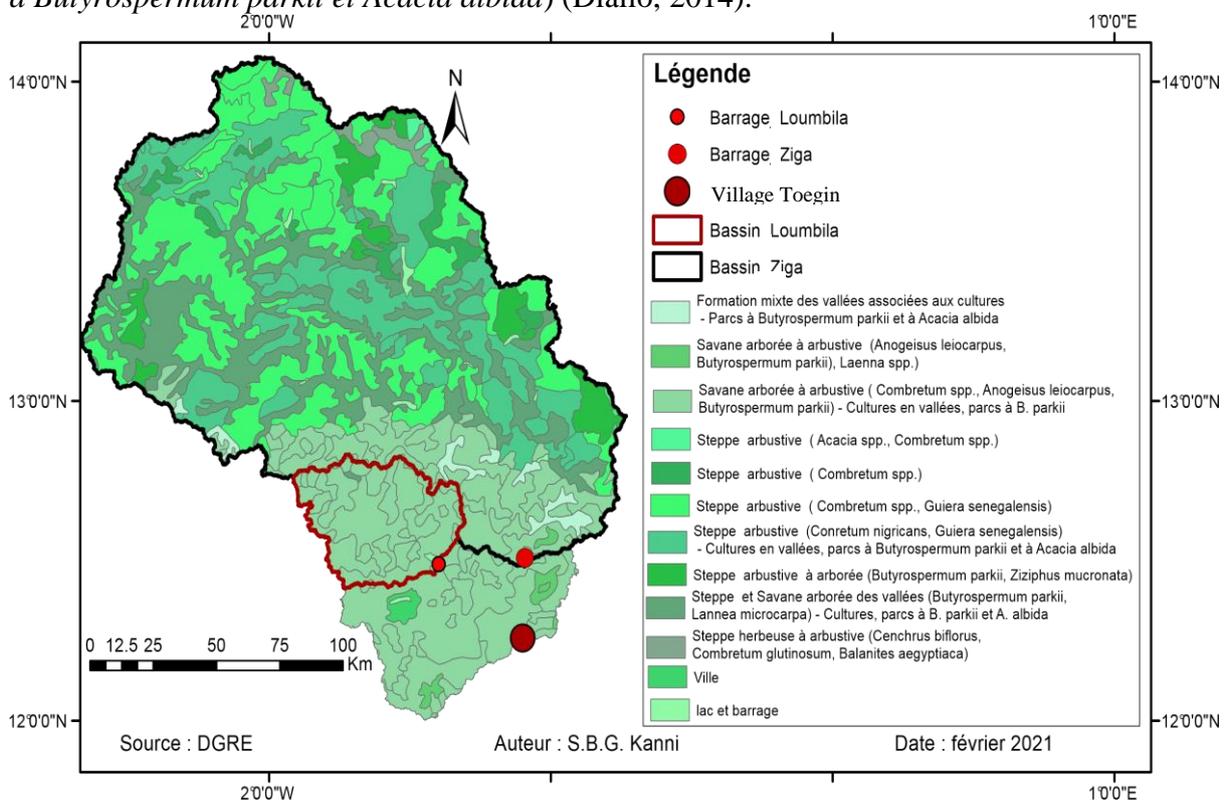


Figure 4 : Végétation du bassin versant

## III.1.1.5. Géologie et hydrogéologie

La figure 5 présente la géologie de la zone d'étude. En effet, le bassin du Nakanbé regroupe des formations géologiques précambriennes composées des formations antébirrimiennes et birrimiennes. Les formations antébirrimiennes regroupent les magmatites indifférenciés qui sont dominantes sur l'ensemble des bassins versants. Les formations birrimiennes sont formées par des roches volcano-sédimentaires et plutoniques. Les roches plutoniques sont représentées par les granites à biotite ou indifférenciés associés aux granodiorites et aux granophyres

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

alcalins. Les roches volcano-sédimentaires sont surtout localisées dans la zone septentrionale et regroupent des métasédiments argileux ou argileux-gréseux, des métavolcanites et pyroclastite (Pieyns & Klein, 1964). La géologie est très déterminante dans la formation et le débit des aquifères. On distingue alors les aquifères sur socle cristallin et les aquifères sur socle sédimentaire.

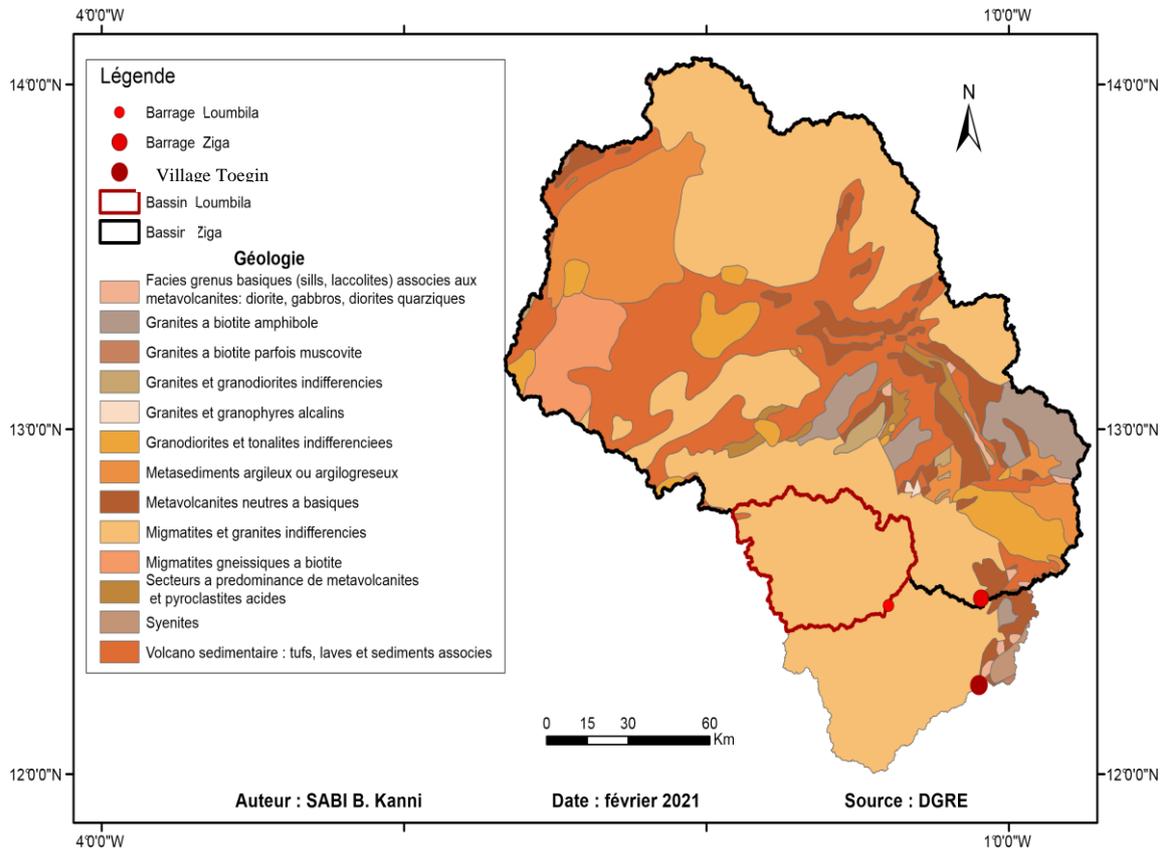


Figure 5 : Géologie du bassin versant

### III.1.2. Cadre socio-économique

#### III.1.2.1. Démographies et sociologies

Les communes bénéficiaires des barrages de Ziga et Loubila sont : Loubila, Ziga, Ziniaré et Ouagadougou. Les populations de ces communes en 2019 sont respectivement 36 455, 48 355, 88 299 et 2 453 496 habitants soit un total de 2 626 605 habitants (INSD, 2020). On y retrouve plusieurs groupes ethniques à savoir les Mossis, la communauté autochtone de Kurumba, les Peuhls, les Rimaïbé, les Yarsé, les groupes de Gourounsi, les Bissa et les Yansé (MEE, 2001).

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## III.1.2.2. Activités économiques

L'économie des populations repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage. Outre ces activités, l'industrie, le commerce, la pêche et l'artisanat sont des activités secondaires pratiquées dans la zone.

## III.2. Données et outils utilisés

### III.2.1. Données utilisées

#### III.2.1.1. Données hydrologiques

Les données hydrologiques (débits et volumes journaliers) sont indispensables dans la mise en œuvre du modèle WEAP. Les débits journaliers nécessaires sont ceux enregistrés en amont du barrage définissant ainsi son remplissage en fonction du temps. Ces données ont été mises à notre disposition par la DEIE. Elles couvrent la période de 2000 à 2018.

#### ➤ Volumes journaliers observés

La figure 6 présente la variation du volume d'eau enregistré dans les retenues de Ziga et Loumbila sur la période de 2000 à 2018. Pour chacune de ces retenues on enregistre des volumes supérieurs à leur capacité de stockage. Ceci témoigne leur déversement dans les périodes de crues.

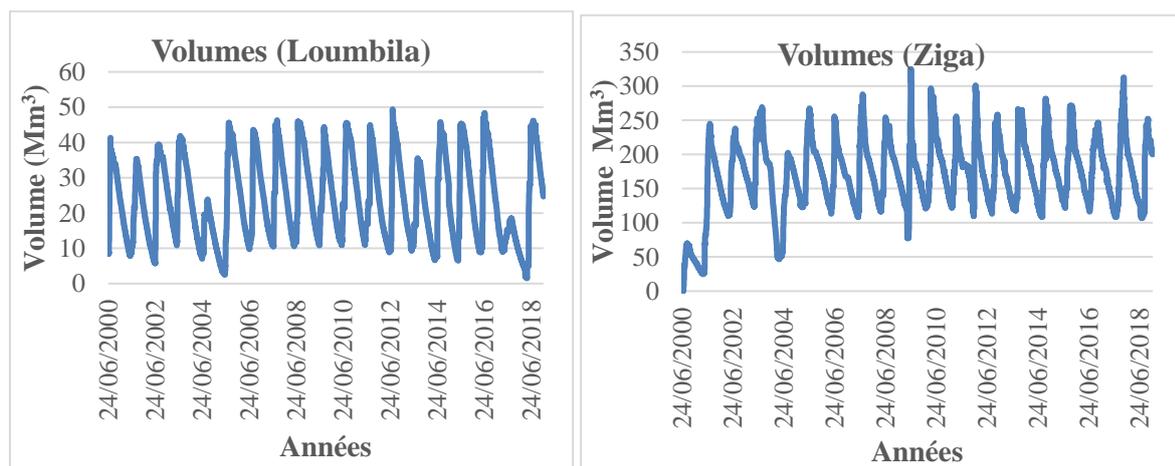
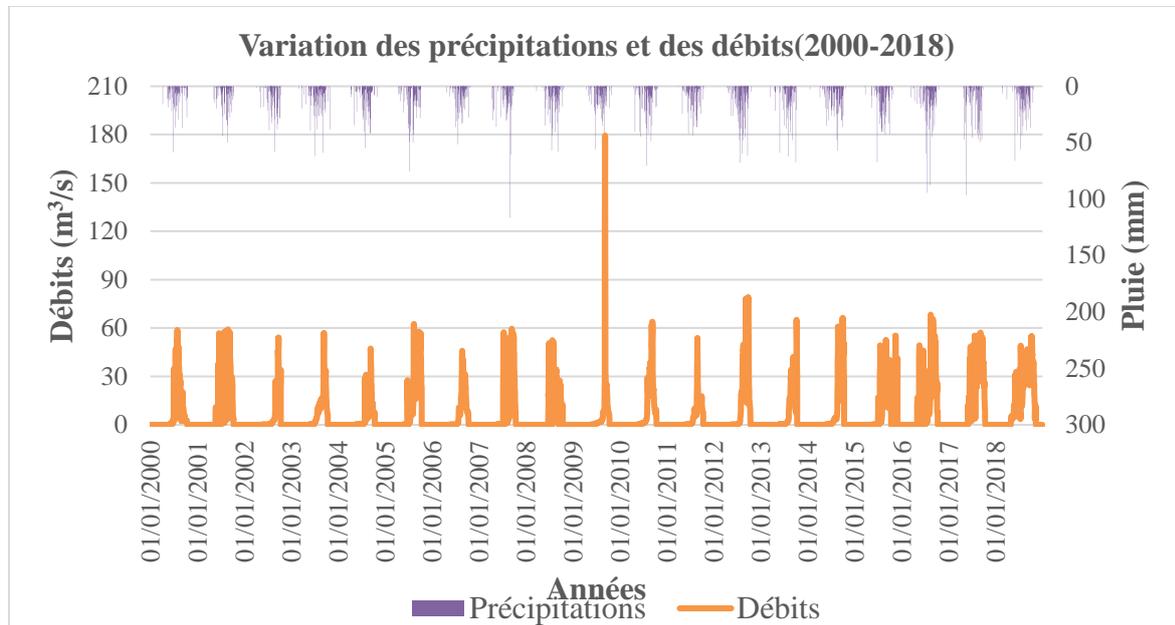


Figure 6 : Variation du stock d'eau dans les barrages de Ziga et Loumbila (2000 - 2018)

#### ➤ Débits observés au niveau du barrage de Ziga

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

La figure 7 présente le rapport entre les précipitations et écoulements sur la période de 2000 à 2018. On observe une forte variabilité d'une année à une autre avec un pic très élevé en 2009 qui s'est d'ailleurs manifesté par des inondations dans la ville de Ouagadougou et ses environs.



**Figure 7 : Variation des débits sur la période de 2000 à 2018**

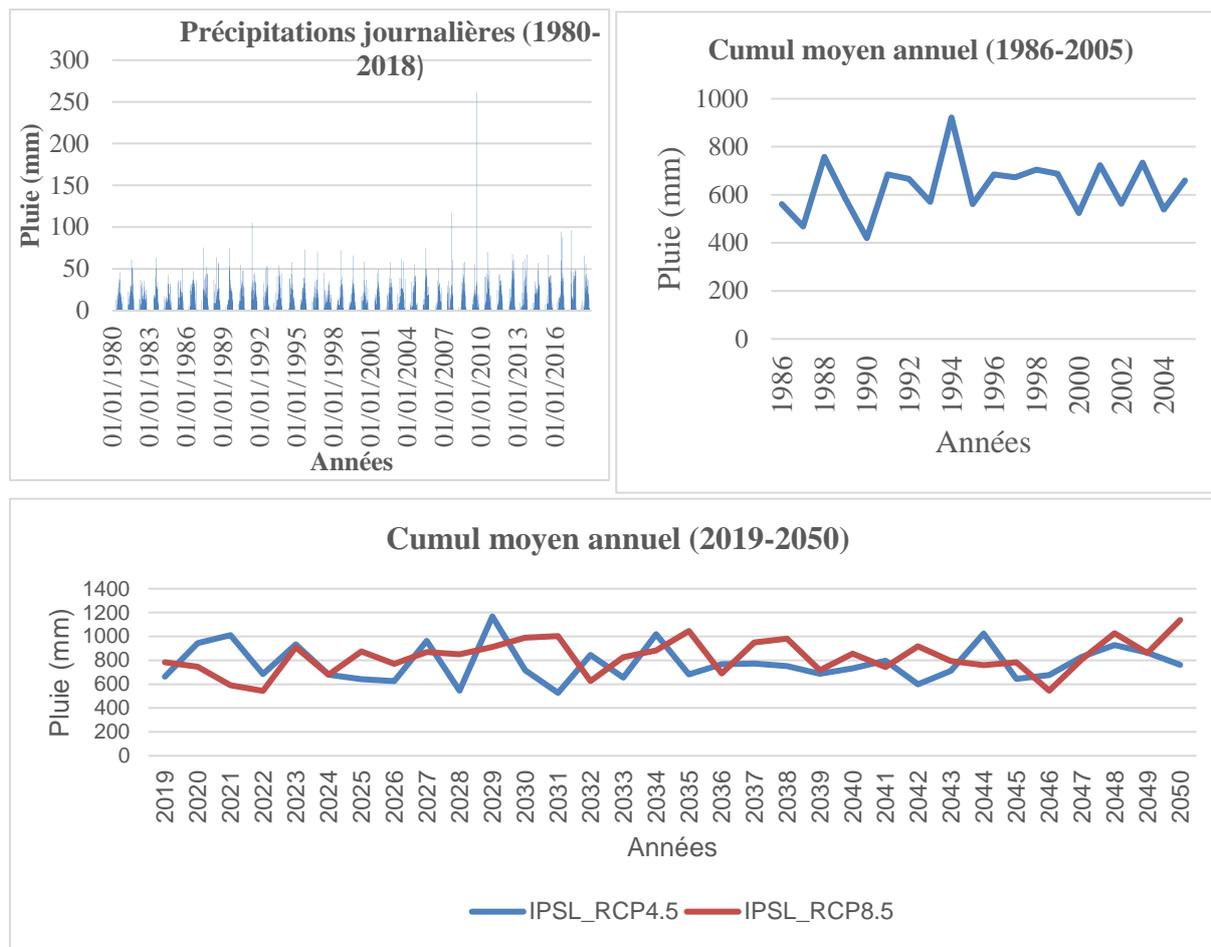
### III.2.1.2. Données climatiques

Les données climatiques utilisées sont entre autres : la pluviométrie journalière, l'humidité relative, la vitesse du vent, l'évaporation journalière observées au niveau de la station synoptique de Ouagadougou sur une chronique de 38 ans (1980 à 2018). Elles ont été fournies par l'Agence Nationale Météorologique (ANAM). Aussi, les précipitations, températures minimales et maximales issus des scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 sur la période de 2019 à 2050 ont été utilisées.

#### ➤ Pluviométrie observées à la station synoptique de Ouagadougou

La figure 8 présente l'évolution de la pluviométrie au cours du temps notamment sur la période de 1980 à 2018 et de 2019 à 2050 (scénarii climatiques). Comme à la figure 7, une forte variabilité des précipitations est observée d'une année à une autre et ce, sur toute la période. En ce qui concerne le cumul moyen annuel, il varie entre 400 mm et 1000 mm tandis que ceux des scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 pour l'horizon futur varient 500 mm et 1 200 mm. Ceci montre qu'on assistera à de fortes pluies sous l'effet du changement climatique.

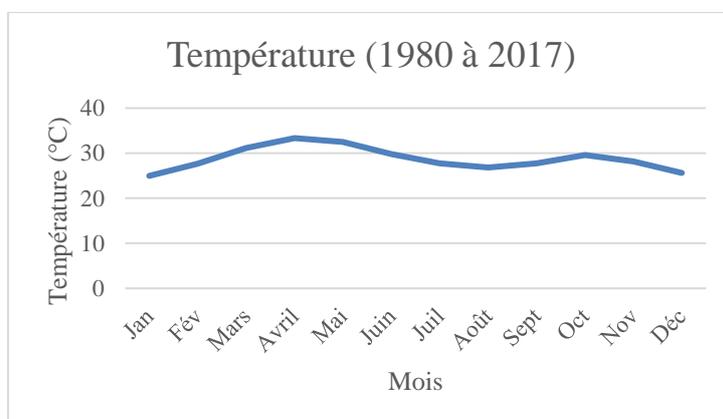
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)



**Figure 8 : Variation de la pluviométrie observée (1980 à 2018) et future (2019 à 2050)**

### ➤ Température moyenne (°C) à la station synoptique de Ouagadougou

La figure 9 présente les moyennes mensuelles de la température sur la période de 1980 à 2017. Les plus hautes sont observées dans la période de février à mai.



**Figure 9 : Variation de la température sur la période de 1980 à 2017**

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### ➤ Évapotranspiration à la station synoptique de Ouagadougou

La figure 10 présente la variation mensuelle de l'évapotranspiration sur la période de 1980 à 2017. Elle varie presque de la même façon que la température avec une variation allant de 130 mm à 200 mm et la plus grande part évaporée s'observe dans les mois de février à avril en raison de forte augmentation de température en ces périodes.

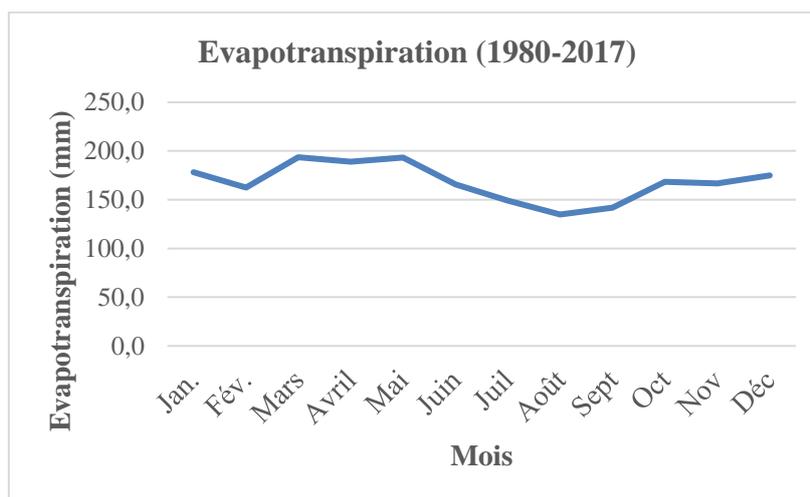


Figure 10 : Évapotranspiration observées sur la période de 1980 à 2017

### III.2.1.3. Données socio-économiques

Ce sont les informations sur les usagers de l'eau des retenues. La population de la ville de Ouagadougou a été obtenue en se basant sur les résultats du recensement effectué en 2019 par l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD). En ce qui concerne l'effectif du bétail ainsi que la superficie irriguée, les données issues d'une enquête menée en 2020 par l'Agence de l'Eau du Nakanbé (AEN) sur l'ensemble des usagers de l'eau dans les rayons du barrage de Loumbila ont été exploitées.

Tableau 3 : Récapitulatif des données utilisées dans le cadre de l'étude

Données	Chronique	Source
Hydrologiques (Volumes et débits journaliers)	19 ans (2000 à 2018)	DEIE

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

Climatiques	38 ans (1980 à 2018)	ANAM
(précipitation, température minimale et maximale, évaporation, évapotranspiration journaliers)	32 ans (2019 à 2050)	amma2050
Socio-économiques	2006 à 2019 pour la population de la ville de Ouagadougou	INSD
	2006 à 2018 Périmètre irrigués et effectif du bétail)	AEN

### III.2.2. Outils utilisés

#### III.2.2.1. Outil SIG

Le logiciel ArcGis 10.3 a permis de délimiter le bassin versant, de le caractériser en utilisant les modèles numériques de terrain. Il nous a permis également d'élaborer les différentes cartes de la zone d'étude.

#### III.2.2.2. KhronoStat

Le logiciel KhronoStat a été utilisé pour vérifier l'homogénéité (le caractère aléatoire) des séries chronologiques des données pluviométriques. Cet outil a été développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

#### III.2.2.3. CropWat

CropWat est un logiciel mis au point par FAO en 1992 basé sur la formule de Penman-Monteith modifiée et sert d'aide à la gestion de l'irrigation. Il a permis de calculer les besoins en eau des cultures. Le CropWat est disponible sur le site internet [www.fao.org](http://www.fao.org).

#### III.2.2.4. RStudio

RStudio a été utilisé pour l'extraction des données climatiques futures de la zone d'étude et aussi pour l'exécution du modèle hydrologique GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier). Il a été exécuté pour combler les lacunes des débits observés et la simulation des débits futurs selon les scénarii RCP4.5 et RCP8.5.

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

En effet, le modèle GR4J est un modèle pluie- débit global à quatre paramètres. Ces paramètres sont  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  où  $X_1$  représente la capacité du réservoir de production (mm),  $X_2$ , le coefficient d'échanges souterrains (mm),  $X_3$ , la capacité à un jour de réservoir routage (mm) et  $X_4$  le temps de base de l'hydrogramme unitaire HUI (j). Ce modèle a été initié au Cemagref au début des années 1980. Il a pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...) (Perrin et al., 2007). Les données d'entrées nécessaire pour le fonctionnement de ce modèle sont : les précipitations et l'évapotranspiration.

### **III.2.2.5. WEAP**

Il a permis d'élaborer et d'analyser les différents scénarii (la variabilité climatique, l'encombrement des retenues, l'accroissement de la population et des superficies irriguées autour des barrages) afin d'aider les décideurs dans la gestion optimale de la ressource. Il est téléchargeable gratuitement sur le site : <http://www.weap21.org>. On y trouvera également les conditions d'acquisition de sa licence.

Nous avons dirigé notre choix vers le modèle WEAP parmi tant d'autres non seulement à cause de sa simplicité, son accessibilité et la disponibilité des données d'entrées mais aussi du fait qu'il a déjà été utilisé dans plusieurs études précédentes. De plus il a été appliqué dans le bassin supérieur de Nakanbé par Ouedraogo (2020) et même à la retenue de Loumbila par Neya (2020) dans le cadre de l'élaboration d'un outil d'aide à la décision en relation avec la ressource en eau.

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## III.3. Méthodologie

### III.3.1. Caractéristiques hydro-morphométriques des bassins versants

Pour la caractérisation des bassins versants, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de type SRTM (disponible en téléchargement libre sur le site USGS) de résolution 30 m a été utilisé dans le logiciel ArcGis 10.3 selon les étapes suivantes :

- La délimitation des bassins versants ;
- Le calcul des superficies et périmètres des bassins versants étudiés. Ces caractéristiques ont permis de déterminer les autres paramètres tels que : l'indice global de pente, le coefficient de compacité de GRAVELIUS ( $K_G$ ), les dimensions des rectangles équivalents ainsi que la dénivelée spécifique selon les formules présentées à Annexe 6 et ;
- La représentation graphique du relief à travers les courbes hypsométriques.

### III.3.2. Analyse prospective sur la capacité des barrages de Ziga et Loumbila à satisfaire les besoins des populations

#### III.3.2.1. Analyse des données hydro-pluviométriques

##### III.3.2.1.1. Critique des données

Les données climatiques ne présentent aucune lacune sur toute la série chronologique. Par contre, des données manquantes ont été remarquées dans les séries de données hydrométriques de la station de Bissiga (station en amont du barrage de Ziga). Les taux de lacunes étant élevés avec des successions d'années de données manquantes (voir annexe 1 et 2), leur comblement par les méthodes exposées dans la littérature ne saurait garantir l'information que traduirait normalement les mesures effectuées. Ainsi, nous avons utilisé le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) pour la simulation des débits à l'exutoire de ce bassin versant et donc reconstituer les débits observés.

### **Données hydrométriques à l'exutoire du bassin de Loumbila**

L'inexistence de station hydrométrique en amont du barrage de Loumbila a suscité l'intérêt des agents de la DEIE à la réalisation des études dans le but d'estimer les apports au niveau de ce barrage. En ce sens, un modèle semi-distribué (HEC-HMS) a été utilisé dans le bassin de Massili par Batiéon (2021) et a permis d'estimer les écoulements à l'exutoire du bassin de Loumbila sur la période de 2000 à 2018.

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

### **III.3.2.1.2. Exécution du modèle GR4J**

La mise en route du modèle s'est effectuée sur l'année 2009, son calage sur la période de 2011 à 2012 et sa validation sur 2014 à 2015. Ces périodes ont été choisies parce qu'il y a peu d'années consécutives dans lesquelles il y a un minimum de données hydrométriques. Après l'étape de calage et de validation, la simulation des débits des années où il n'y a pas d'observations a été effectuée. En effet, pour exécuter le modèle GR4J, nous avons d'abord établi une feuille Excel à trois (03) colonnes dont respectivement les précipitations nommé P, évapotranspiration (E) et débits Q(mm/j). Les chroniques de précipitations et évapotranspiration devront être complètes (sans lacunes). Pour les débits, les cellules vide sont marquées par « NA » lors de l'établissement de la feuille Excel. Ensuite on fait varier les paramètres ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  et  $X_4$ ) jusqu'à ce que les courbes de débits observés et simulés se coïncident et que la valeur du critère de Nash soit supérieure à 0,5. Les courbes de calage et de validation ainsi que les critères de performances du modèle GR4J sont présentées à l'annexe 2.

### **III.3.2.1.3. Analyse de l'homogénéité des séries de données pluviométriques**

#### **➤ Détection de rupture**

La détection de ruptures dans les séries chronologiques est l'une des étapes de la caractérisation des tendances climatiques. Cela s'est fait à l'aide du logiciel KhronoStat selon différents tests statistiques (Pettitt, Segmentation de Hubert, BUIHAND et ellipse de BOIS etc.). Nous avons opté pour le test de Pettitt à cause de sa robustesse (Lubès et al., 1994) et son application dans plusieurs études précédentes (Gautier et al., 1998 ; Kingumbi et al., 2000). Ce test permet de vérifier la continuité d'une série chronologique. Si l'hypothèse  $H_0$  (absence de rupture) est rejetée, il précise une date de rupture probable. Voir l'Annexe 2 pour plus de détail sur le test de Pettitt.

#### **➤ Analyse de la variabilité climatique**

La méthode de Nicholson a été utilisée pour le calcul des indices pluviométriques. Cette méthode permet de mettre en évidence les périodes humides et sèches au sein d'une série chronologique (Irie et al., 2015). L'indice de Nicholson se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation suivante :

$$ISP_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma}$$

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

Avec :  $ISP_i$  Indice Standardisé de Pluie pour l'année  $i$ ,  $P_i$  cumul pluviométrique pour l'année  $i$ ,  $\bar{P}$  moyenne interannuelle de la variable sur la période d'étude,  $\sigma$  écart type de la série sur la période d'étude. Le tableau 4 présente le degré de sécheresse en fonction des indices pluviométriques.

**Tableau 4 : Classification de la sécheresse en fonction de l'indice de Nicholson**

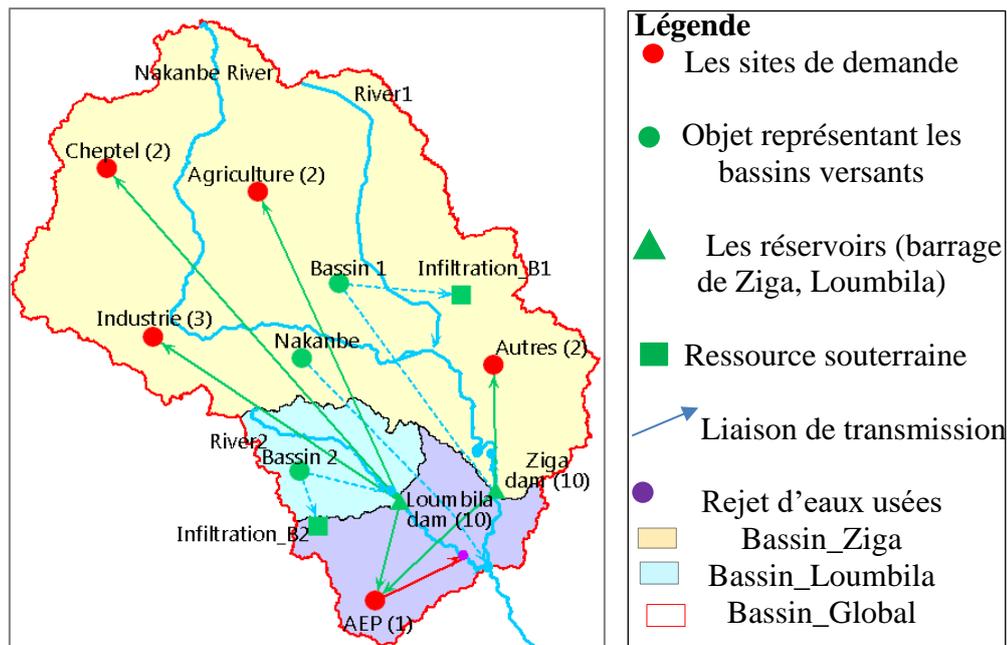
Classes de l'indice pluviométrique	Degré de la sécheresse
$ISP > 2$	Très humide
$0 < ISP < 2$	Humide
$-2 < ISP < 0$	Sec
$ISP < -2$	Très sec

### III.3.3. Modélisation de l'allocation de l'eau avec WEAP

#### III.3.3.1. Élaboration du schéma conceptuel du domaine d'étude

La figure 10 présente le schéma conceptuel du modèle WEAP. Ce schéma permet de représenter de façon schématique tous les sites ainsi que les liaisons qui existent entre eux. Dans le cadre de cette étude, deux catégories de sites sont présentées à savoir les réservoirs et les sites de demandes. Les réservoirs sont les points de prélèvement d'eau (barrages de Loubila et de Ziga) vers les sites de demandes. L'Approvisionnement en Eau Potable (AEP), le cheptel, l'agriculture et l'industrie sont les sites de demandes identifiés autour de ces barrages. Selon l'AEN, le barrage de Ziga est réservé uniquement pour l'AEP mais nous considérons 10 % des besoins AEP (urbains et ruraux) pour les besoins annexes notés « autres » sur le schéma conceptuel. Le sens de l'allocation de l'eau est indiqué par les liaisons de transitions dont les flèches sont irréversibles.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



**Figure 11 : Schéma conceptuel du modèle WEAP**

### III.3.3.2. Définition des paramètres généraux

Il s'agit de définir un scénario de référence, la période sur laquelle les scénarii vont être exécutés et de préciser un pas de temps ainsi que les unités. Nous avons considéré 2018 comme année de référence à cause de la disponibilité des données, et l'année 2050 comme l'horizon des scénarii. Le pas de temps mensuel a été choisi.

### III.3.3.3. Modélisation de l'allocation de l'eau

#### III.3.3.3.1. Sources d'approvisionnement

L'offre représente la quantité d'eau que l'ouvrage est en mesure de fournir pour les différents usages. Elle peut être aussi définie comme étant la quantité d'eau disponible dans chaque barrage à la fin de la saison des pluies (les pluies étant considérées comme seuls apports dans le barrage). Dans l'application du modèle, les données d'entrées au niveau des réservoirs sont :

- Le débit mensuel entrant dans le réservoir ;
- La capacité de stockage ou capacité totale du réservoir ;
- Les volumes mensuels observés au compte actuel (2018) et sur une période historique pour la calibration ;
- Le stockage initial ou la quantité d'eau stockée dans la retenue au mois choisi comme début de l'année hydrologique ;
- La courbe hauteur-volume ;

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

- Les différents facteurs qui peuvent influencer la quantité de l'eau stocker à savoir l'évaporation nette, la perte par infiltration.

WEAP considère les quatre zones d'un réservoir comme des contraintes dans la gestion des barrages. Ces zones sont : la capacité totale, le niveau d'eau normal, le niveau tampon et le niveau d'eau minimal (Figure 12).

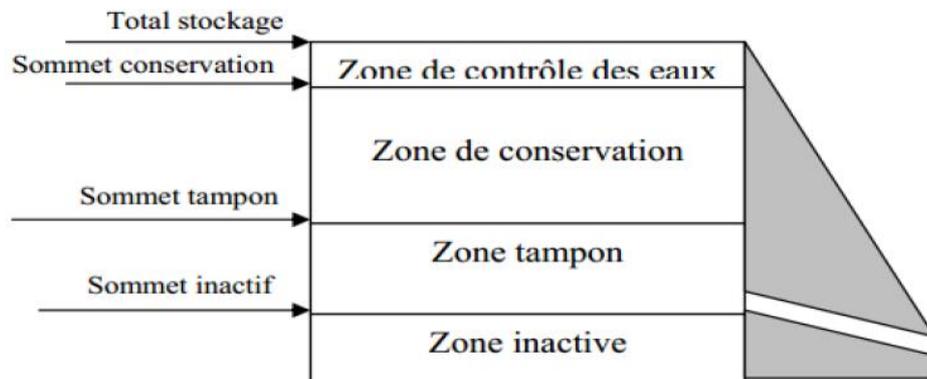


Figure 12 : Zones de fonctionnement d'un réservoir (Source :WEAP)

### III.3.3.3.2. Usages et demandes en eau

La demande en eau correspond à la quantité d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins en eau de tous les usagers au cours de l'année. Les données nécessaires sont :

- Le niveau d'activité correspondant à la surface irriguée pour les sites agricoles, au nombre d'usagers de l'eau pour l'AEP, au nombre de têtes par type de bétails pour le cheptel et au nombre de camions qui prélèvent l'eau du barrage chaque jour pour les sites industriels ;
- La consommation annuelle par unité d'activité ;
- La variation mensuelle.

#### ❖ Demande en eau pour AEP

Il s'agit d'évaluer la quantité d'eau potable nécessaire pour satisfaire les besoins des populations. Nous avons évalué cette demande en nous basant sur le prélèvement journalier de l'ONEA. Pour l'alimentation en eau potable de la ville de Ouagadougou, en 2018, il en ressort une contribution de 13,05 % et 86,95 % respectivement pour les retenues de Loumbila et de Ziga.

Le niveau d'activité correspond au nombre d'habitants alimentés en eau potable à partir de ces barrages. D'après les résultats du dernier recensement par INSD, la population de la ville de

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

Ouagadougou en 2019 est de 2 453 496. La population de la ville de Ziniaré et les villages dans les rayons de 5 km du réseau d'adduction en eau potable desservie par l'ONEA a été estimée en fonction de la quantité d'eau qui leur est envoyée et de la consommation journalière par personne en milieu rural. En effet, l'ONEA estime cette consommation à 20 L par jour et par personne (MEE, 2001) mais nous considérerons 25 L dans le cadre de cette étude. Pour le milieu urbain, la consommation spécifique a été évaluée à 65,95 L par personne et par jour en se basant sur la quantité d'eau prélevée par l'ONEA en 2018 et la population desservit.

### **❖ Demande en eau du cheptel**

C'est la quantité d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins en eau du bétail. Pour l'évaluer, il convient de connaître les espèces qui s'abreuvent au niveau de la source d'eau, leur effectif ainsi que la consommation par tête et par espèce. Selon les enquêtes réalisées par l'AEN, en 2020 environ 72 840 têtes d'animaux s'abreuvaient au niveau du barrage de Loumbila (DGAEN, 2020). Les détails sont présentés dans le tableau 5.

**Tableau 5 : Effectif du bétail**

<b>Espèces</b>	<b>Bovins</b>	<b>Ovins</b>	<b>Caprins</b>	<b>Asins</b>
<b>Nombre de têtes</b>	11 570	36 150	24 000	1 120

Nous avons estimé la projection du nombre de bétail à travers la formule suivante :  $P = P_0(1 + \alpha)^n$  avec  $\alpha$  compris entre 2 à 4 % pour les bovins ; entre 0 et 5 % pour les ovins et caprins (Akpaud, 2007). Nous avons retenue respectivement 2 % et 4 %.

P : population projetée ;

$P_0$  : population initiale en 2020 ;

$\alpha$  : taux de croissance moyen annuel en fonction de l'espèce ;

n : différence entre la date projetée et la date initiale.

Étant donné que les besoins en eau diffèrent d'un animal à un autre, nous procéderons par conversion en utilisant l'unité de bétail tropical (UBT). Une unité de bétail tropicale a été prise égale à un animal herbivore de 250 kg vif ([www.fao.org](http://www.fao.org)) et la consommation d'un tel animal est de 40 l/j (Ouedraogo, 2020). Ainsi, pour un poids moyen de 188 kg pour le bovin, 20 kg pour les caprins et ovins et 135 kg pour les asins, on a respectivement 0,75 UBT, 0,08 UBT et 0,54 UBT.

### **❖ Demande en eau agricole**

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

C'est la quantité d'eau nécessaire pour les différentes spéculations irriguées autour de chaque barrage. En se basant toujours sur les enquêtes de l'AEN, 3000 ha sont irrigués autour du barrage de Loumbila en 2020. Les différentes spéculations irriguées sont : la tomate, l'oseille, le haricot, les choux, aubergine, maïs, le riz.

Le logiciel CropWat a été utilisé pour évaluer la quantité d'eau nécessaire pour l'irrigation en se basant sur la culture la plus consommatrice d'eau qui est le riz. Les besoins en eau trouvés par CropWat sont les besoins nets des cultures, nous avons donc appliqué une efficacité de 65 % du système d'irrigation pour avoir les besoins bruts sachant que l'irrigation par aspersion est la technique d'irrigation utilisée sur le site.

### **❖ Demande en eau industrielle**

D'après les enquêtes terrain de l'AEN, environ 63 camion-citernes de 30 m<sup>3</sup> des entreprises BTP prélèvent l'eau du barrage de Loumbila. Nous estimons un tour par camion pendant huit mois car pendant la saison des pluies, ils n'ont pas accès à la retenue.

**NB :** Il faut noter que la demande en eau en agriculture a été évaluée sur une période de sept mois, celles des sites industriels et du cheptel sur une période de huit mois car en saison des pluies, ils n'ont pas accès au réservoir.

### **❖ Perte par infiltration**

Les pertes par infiltration au niveau des barrages sont dues à un défaut d'étanchéité. Elles sont réduites au fil des années, par le comblement de la cuvette avec des dépôts argileux rendant le fond du réservoir quasiment imperméable. Dans le cadre de cette étude, nous considérons 5 % des pertes mensuelles.

#### **III.3.3.4. Définition des règles de priorité au niveau de l'approvisionnement en eau**

Pour préciser au logiciel WEAP quelle demande doit être satisfaite en premier, il est important de classer les sites de demande par ordre de priorité. Cet ordre varie de 1 à 99. Plus la demande est prioritaire, plus le chiffre tend vers 1 (Figure 11).

#### **III.3.3.5. Calibration du modèle WEAP**

Avant d'utiliser un modèle, il est nécessaire de faire le calage sur la base des données historiques afin de s'assurer de sa performance pour les simulations futures. Ainsi, le calage du modèle WEAP s'est fait sur la base des débits entrants, des volumes mensuels observés au niveau des retenues et des données socio-économiques sur une période historique. En principe, le choix de la période du calage et de validation devrait se faire en tenant compte de la date de rupture

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

détectée. Mais nous avons pu réunir les données sur l'usage de l'eau à partir de 2006. En fonction de ces données obtenues, la calibration a été faite sur une période de 8 ans (2006 à 2013) et la validation sur une période de 5 ans (2014 à 2018).

### Validation du calage

Lors du calage, les observations devront être suivie d'une vérification quantitative sur la base des différents critères d'évaluation de performance. Il s'agit : le critère de Nash et Sutcliffe (1970) noté NSE et le pourcentage de biais (PBIAS). Un modèle est dit satisfaisant si  $NSE > 50\%$  et  $PBIAS < \pm 25\%$ . Le critère NSE permet de vérifier le degré d'ajustement entre les valeurs observées et celles simulées. Il se calcul par la relation suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - \bar{X}_{obs})^2}$$

Le biais ou PBIAS décrit la fidélité du modèle

$$PBIAS = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})}{\bar{X}_{obs}} \times 100$$

Avec  $X_{obs,i}$  et  $X_{sim,i}$  respectivement les valeurs observées et simulées par le modèle et  $n$  représente le nombre d'observation.

### III.3.3.6. Analyse prospective : élaboration des scénarios

L'ensablement continue des retenues d'eau, l'augmentation de la population et des surfaces irriguées ainsi que les effets du changement climatique sont autant de facteurs qui peuvent influencer négativement la disponibilité de l'eau à court, moyen et long terme.

Les différents scénarii élaborés permettent de mettre en évidence les effets de ces facteurs afin de déterminer les vulnérabilités clés, d'évaluer et d'identifier les stratégies d'adaptation.

#### III.3.3.6.1. Analyse de la situation de référence (scénario de référence)

Ce scénario considère que le climat et la population restent constants jusqu'en 2050. Il a servi d'éléments de comparaison avec les autres scénarii en mettant en exergue l'écart entre ce scénario et les différents scénarii d'évolution développés.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### III.3.3.6.2. Augmentation de la population

L'augmentation de la population implique l'augmentation des besoins en eau. Selon les résultats des recensements de la population et de l'habitat, la population de Ouagadougou a augmenté de 7,4 % entre 1960 et 1975, de 9,9 % entre 1975 et 1985, de 4,4 % entre 1985 et 1996, de 7,6 % entre 1996 et 2006 (Guengant, 2009) et le taux de croissance actuel (2006 à 2019) de la population est de 7,2 %. Dans ce scénario, nous avons considéré des taux d'accroissement par palier et un déclin d'un pourcent (1 %) chaque 5 ans après 2025 afin de prendre en compte la saturation du milieu. On a donc 7,3 % entre 2020 à 2025, 6,3 % entre 2025 et 2030, 5,3 % entre 2030 et 2035, 4,3 % entre 2035 et 2040. Après 2040, on considère un taux d'accroissement constant (3,3 %) jusqu'en 2050. Pour le milieu rural, un taux d'accroissement de 2,2 % chaque année a été considéré. La projection de la population en fonction de ces taux de croissance est consignée dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Projection de la population à l'horizon 2050**

Années	Estimation de la population					
	2018	2025	2030	2035	2040	2050
<b>Population urbaine</b>	2 288 709	3 744 412	5 082 180	6 579 484	8 121 073	11 236 127
<b>Population rurale</b>	258 482	301 014	335 615	374 193	417 206	5182

### III.3.3.6.3. Augmentation des périmètres irrigués

Ce scénario permet de prendre en compte l'intensification de l'exploitation des terres cultivables. Comme indiqué au niveau de la demande en eau en agriculture, la superficie irriguée autour du barrage de Loumbila est de 3000 ha en 2020. Dans ce scénario, il sera considéré que cette superficie est restée constante depuis 2018. Étant donné que toute la superficie exploitable autour de cette retenue est de 4500 ha (DGAEN, 2020), on estime donc une augmentation de 1 % soit 30 ha chaque année. Ainsi d'ici 2050, 3900 ha seront irrigués.

### III.3.3.6.4. Scénario d'encombrement des retenues d'eau

L'encombrement des retenues est un phénomène naturel dû aux ruissellements des matières solides. La sédimentation et la distribution des sédiments dans les retenues sont des problèmes cruciaux auxquels les concepteurs et constructeurs de barrages sont confrontés (Lanser, 1958). Ces apports solides influent sur :

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

- Le volume d'eau disponible ;
  - La sécurité des ouvrages par l'augmentation de la densité des boues et l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques des ouvrages ;
  - Les risques de débordement en cas de crue et les risques de détérioration et de blocage des organes annexes de gestion (prises d'eau, vidanges de fond, évacuateurs de crues...).
- **Estimation du taux d'envasement des barrages :**

La formule de GOTTSCHALK a été utilisée pour estimer le taux d'envasement au niveau de chaque retenue :  $D = 260 \times S^{-0,1}$ ,  $V = D \times S$  (Sawadogo, 2018) avec

$D$  = Dégradation spécifique annuelle ( $\text{m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ )

$S$  = Superficie du bassin versant ( $\text{km}^2$ )

$V$  = volume annuel de dépôt solides ( $\text{m}^3/\text{an}$ )

Dans la mise en œuvre du modèle WEAP, les paramètres tels que : capacité totale du barrage (annexe 10), le volume mensuel observé, le niveau d'eau minimal et les courbes hauteur-volume devront être changés.

➤ **Volume mensuel observé :**

Il correspond au volume net enregistré au niveau de la retenue chaque mois. Il est obtenu par la formule suivante :  $V_{mens.net\ i} = V_{mens.obs} - V_{dsi}$

Avec  $V_{mens.net\ i}$  : Volume mensuel net observé dans la retenue à l'année  $i$

$V_{mens.obs}$  : volume mensuel observé

$V_{dsi}$  : Volume des dépôts solides au fond de la cuvette à l'année  $i$ .

### III.3.3.6.5. Prise en compte du changement climatique

L'influence du changement climatique sur le cycle de l'eau se traduit par la hausse ou la baisse (pendant une longue durée) des paramètres climatiques tels que : précipitation, évaporation, humidité relative, température. Ce scénario permet de prendre en compte les variabilités climatiques et leurs effets sur les ressources en eau des barrages étudiés. Les projections des débits futurs ont été faites avec les données climatiques du modèle global IPSL-CM5A-LR sous les scénarii RCP4.5 et RCP8.5. Ces données à pas de temps journalier ont été téléchargées sur le site de Amma2050 (BC\_EWEMBI) sous le lien [http://amma2050.ipsl.upmc.fr/CMIP5\\_AFRICA](http://amma2050.ipsl.upmc.fr/CMIP5_AFRICA) et couvrent la période de 2019 à 2050. Le choix de ces modèles s'est fait en deux étapes :

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

1. Le recensement des modèles utilisés sur le bassin du Nakanbé (MECV, 2010 ; Yonaba, 2020). Il s'agit de : IPSL-CM5A-LR, CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR et CSIRO-MK3-6-0 ;
2. L'application de ces modèles sur les bassins de Loumbila et Ziga en se basant sur les critères graphiques et numériques. Cette étape nous a permis de retenir le modèle (IPSL-CM5-LR) qui représentent au mieux le climat de notre zone d'étude sur la période de référence (1986 à 2005).

Pour les études d'impact, les données issues des modèles climatiques doivent être corrigées afin d'éliminer les biais engendrés par les modèles. Pour donc éliminer ce biais, nous avons appliqué la méthode de correction « Linear scaling (LS) » dont la performance a été démontrée (Shrestha et al., 2017). Pour l'évaluation des modèles, les critères graphiques et numériques sont présentés à l'annexe 3.

Pour le calcul de l'évapotranspiration, la formule de Hargreaves et Samani, 1985 a été utilisée. Cette méthode ne requiert que les températures minimales et maximales pour l'estimation de l' $ET_0$ .

### **III.3.3.7. Proposition de stratégies pour une gestion durable des retenues d'eau de Ziga et Loumbila**

Les scénarii d'amélioration suivants ont été élaborés dans le but d'une gestion rationnelle des ressources en eau des retenues de Ziga et de Loumbila face aux demandes évolutives de la population, l'encombrement des cuvettes et les effets du changement climatique.

#### **III.3.3.7.1. Utilisation des spéculations moins exigeantes en eau**

Ce scénario a été conçu dans le but d'améliorer la satisfaction des besoins en eau. La variété de riz choisie est de cycle moyen (120 jours) permettant d'économiser environ 5839 m<sup>3</sup> par hectare chaque année par rapport à la première variété qui était de 180 jours.

#### **III.3.3.7.2. Suppression de tous les sites de demande hormis l'AEP**

Dans ce scénario, tous les sites de demande ont été exclus en dehors de l'AEP. Il a permis d'évaluer la satisfaction des besoins en eau en AEP dans le cas où tous les autres usages de l'eau sont proscrits au niveau des barrages.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### III.3.3.8. Schéma synoptique du fonctionnement du logiciel WEAP

La figure 12 présente le schéma de principe du modèle WEAP. Il présente les différentes étapes de la mise œuvre du modèle.

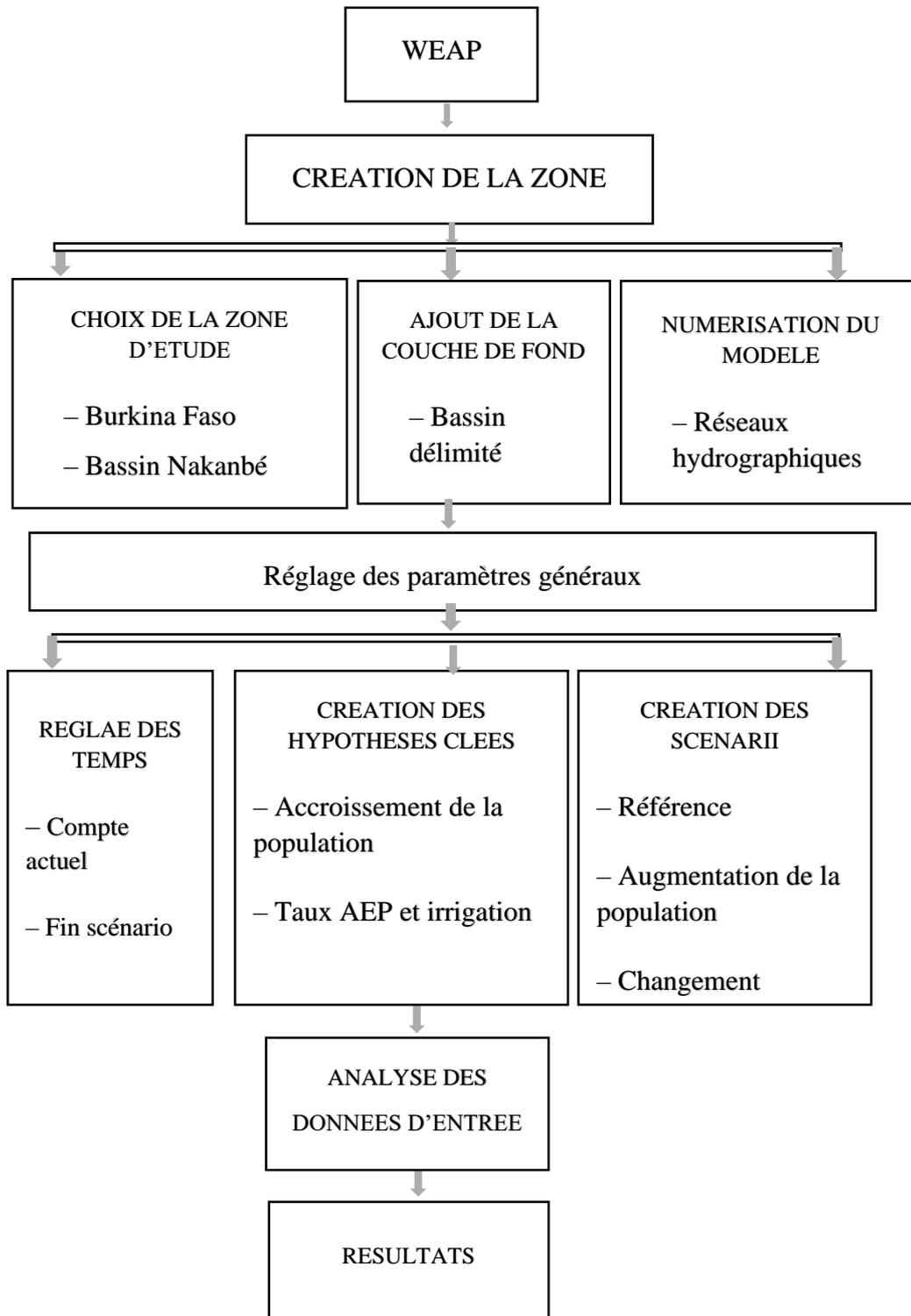


Figure 13 : Schéma de principe du modèle WEAP

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

##### IV.1. Caractérisations morphologiques du bassin versant

Le tableau 7 présente les caractéristiques morphométriques des bassins versants de Loumbila et de Ziga (voir les formules dans l'annexe 6).

En se basant sur les résultats obtenus, les bassins versants de Loumbila et celui de Ziga sont tous qualifiés de très grand bassin. Par ailleurs, les faibles valeurs de la densité de drainage indiquent que les écoulements dans les bassins versants sont en général faibles. Ceci peut être lié à la faiblesse du relief ou à la forme des bassins versants. Les résultats obtenus pour le bassin de Loumbila corroborent avec ceux obtenus par Batiennon (2021) dans le cadre de la caractérisation hydrologique du bassin versant de Massili à Gonsé.

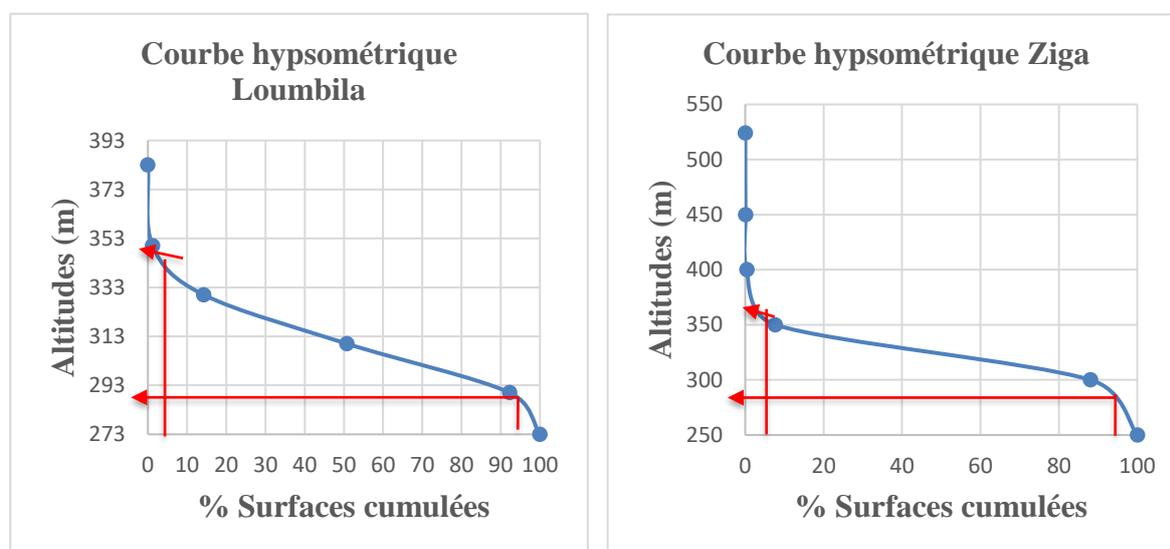
**Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant**

Caractéristiques	Symboles	Unités	Bassin versant de Loumbila	Bassin versant de Ziga	Normes	Commentaires
Surface	S	(km <sup>2</sup> )	2080,11	20 689,11	>2000	Très grand bassin
Périmètre	P	(km)	291	1048,87		-
Largeur du rectangle équivalent	l	(km)	16,08	42,97		-
Indice de compacité	$K_G$	-	1,79	2,04	>1	Forme allongée
Densité de drainage	$D_d$	(km/km <sup>2</sup> )	0,14	0,15		Faible
Indice global de pente	$I_g$	(m/ km)	0,46	0,17		-
Dénivelée spécifique	$D_s$	(m)	20,80	23,90	$10 < D_s < 25$	-
Pente moyenne	$I_{moy}$	(%)	0,24	0,19		Faible

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### Courbe hypsométrique

La figure 13 présente les courbes de la répartition des altitudes en fonction des surfaces cumulées. Il ressort de ces courbes que 95 % du bassin de Loumbila est au-dessus de l'altitude 288 m et 5 % au-dessus de 337 m. Par contre au niveau du bassin de Ziga on a respectivement 280 m et 360 m. De plus, en se basant sur les pentes des bassins versants on peut dire que celui de Ziga est plus jeune et moins érodé par rapport au bassin de Loumbila. Ces caractéristiques indiquent que la retenue de Ziga est successive d'accumuler moins de boues par rapport à celle de Loumbila à l'horizon 2050.



**Figure 14 : Courbes hypsométriques des bassins versants des barrages étudiés**

### IV.2. Analyse des données pluviométriques

#### IV.2.1. Analyse de l'homogénéité des données pluviométriques

L'application du test de Pettitt sur les données pluviométriques de la station synoptique de Ouagadougou sur la période 1980 à 2018 montre qu'il y a eu une rupture en 2002. Les valeurs des moyennes et écart-types avant et après la rupture sont inscrites dans le tableau 8.

**Tableau 8 : Résultats du test de Pettitt**

Station	Date de rupture	Moyenne et écart-type			
		Avant rupture (1980 à 2002)		Après rupture (2003 à 2018)	
		Moyenne 1	Ecart-type 1	Moyenne 2	Ecart-type 2
Ouagadougou	2002	688,84	82,53	827,39	104,52
Excédent/déficit		0,198			

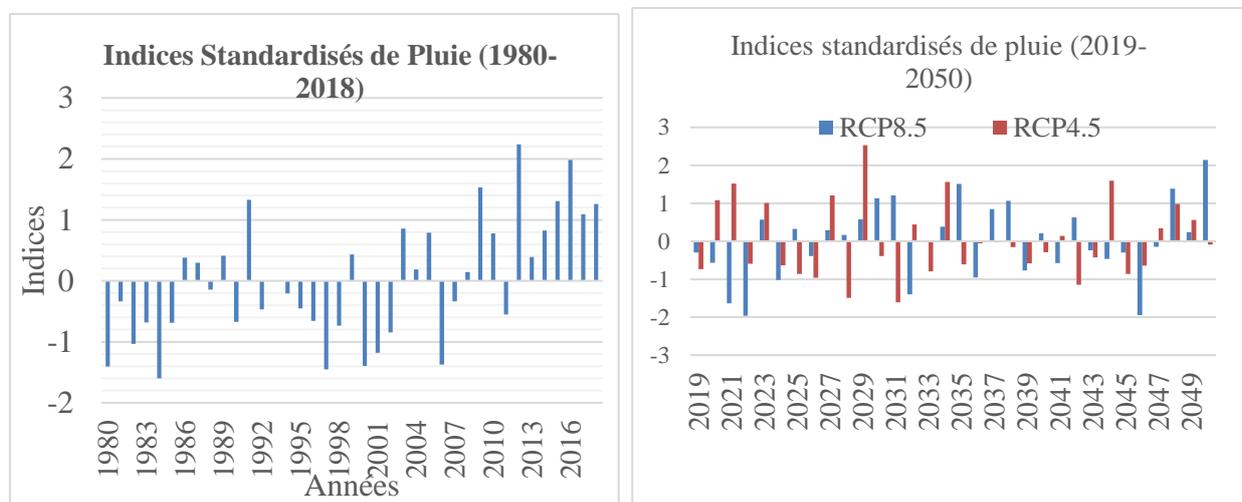
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

La variation de la moyenne entre la série avant et celle après rupture (déficit/excédent) étant positive, nous avons une tendance à la hausse des précipitations à partir de 2003.

### IV.2.2. Analyse de la tendance climatique

L'indice standardisé de pluie a été calculé au niveau de la station synoptique de Ouagadougou sur la période de 1980 à 2018 et 2019 à 2050 issus des scénarii RCP4.5 et RCP8.5 présenté à la figure 14. Nous remarquons une distinction de trois grandes périodes marquantes : une période sèche de 1980 à 2002, une période intermédiaire (humide et sèche) entre 2003 à 2011 et une période humide de 2012 à 2018. En effet, les déficits pluviométriques observés entre 1980 et 2002 témoignent la continuité des grandes sécheresses des décennies 70 et 80 qui ont été mentionné par plusieurs auteurs (Mahe et *al*, 2010 ; Ozer et *al*, 2010). Ces résultats confirment la rupture observée en 2002 avec le test de Pettitt et sont conformes à ceux obtenus par Batiennon (2021).

En ce qui concerne les scénarii RCP4.5 et RCP8.5, on a une alternance sur toute la période se traduisant par la variabilité des précipitations d'une année à une autre. En comparant ces scénarii on remarque que le RCP8.5 a plus d'années humide par rapport au RCP4.5



**Figure 15 : Indices standardisés de pluie observés (1980 à 2018) et issus des scénarii RCP4.5 et RCP8.5**

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

## IV.3. Calibration du modèle WEAP

### IV.3.1. Comparaison des volumes observés et simulés au niveau des retenues d'eau

Le calage s'est fait sur la période de 2006 à 2013 et la validation sur la période de 2014 à 2018. La figure 15 présente les volumes observés et simulés par le modèle WEAP. On remarque que, de façon générale, le modèle a tendance à surestimer les volumes simulés dans les réservoirs. C'est ce qui explique d'ailleurs les valeurs négatives des pourcentages de biais. Au niveau de la retenue de Loubila, les volumes simulés sont sous-estimés en début des simulations à cause de la forte demande appliquée. Aussi en 2017, on observe une grande variation entre les deux courbes. Une telle variation peut être liée à une augmentation des taux d'infiltration et d'évaporation au niveau de la retenue ou à des usages imprévus et non enregistré par l'AEN.

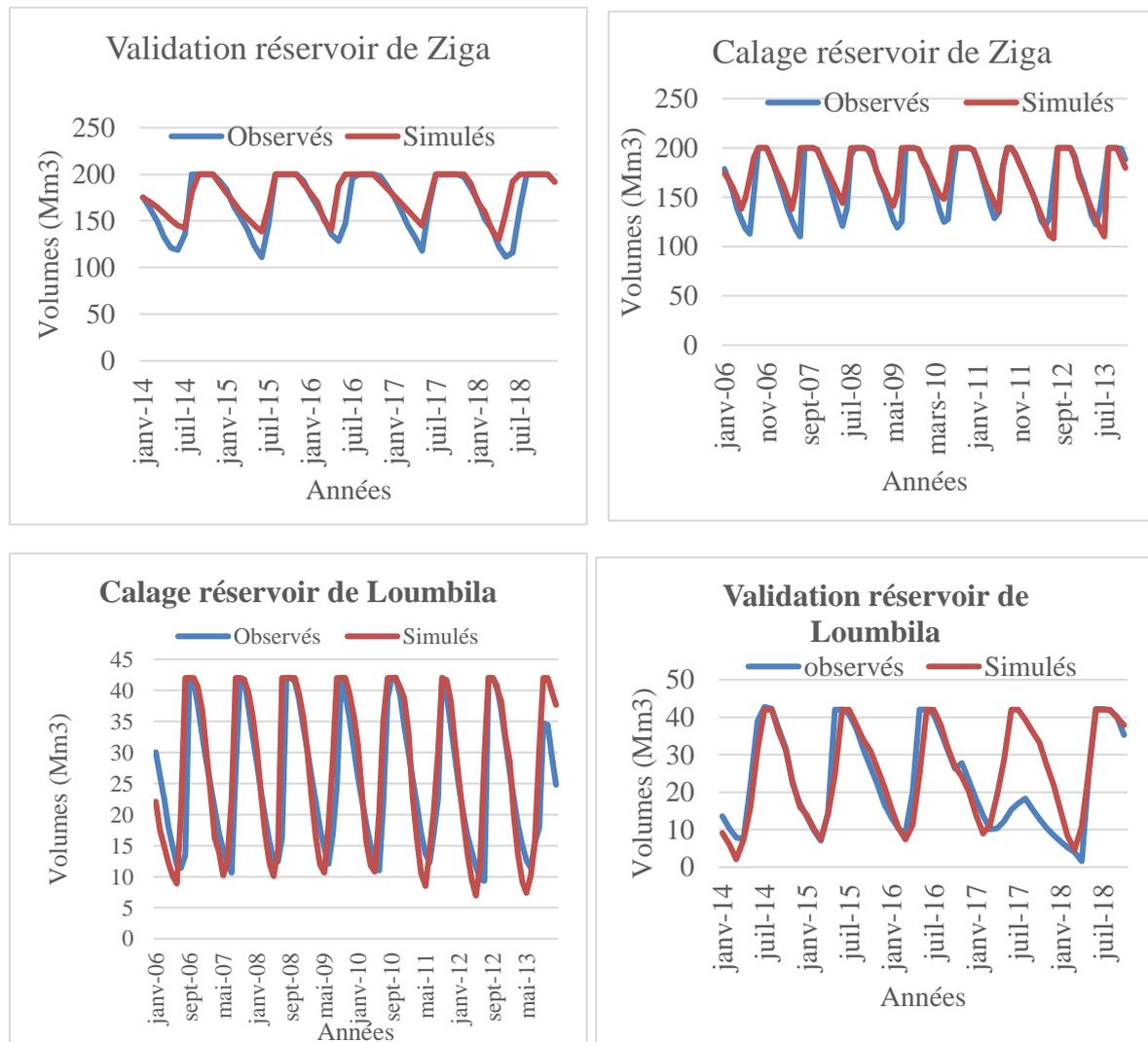


Figure 16 : Courbes de calage et validation du modèle WEAP

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### IV.3.2. Appréciation de la performance de WEAP

En plus des observations visuelles, la performance du modèle a été évaluée quantitativement sur la base des critères statistiques : le critère de Nash et Sutcliffe (1970) noté NSE et le pourcentage de biais (PBIAS) (tableau 9).

**Tableau 9 : Synthèse des résultats du calage et de validation du modèle**

Critères de performance	Calage		Validation		Norme
	Ziga	Loumbila	Ziga	Loumbila	
Années	2006-2013		2014-2018		
PBIAS	-3,44 %	-6.72 %	-5,41 %	-8,87	PBIAIS = $\pm 25$ %
NSE	58,20 %	61.86 %	59,82 %	53 %	NSE > 50 %

Les valeurs obtenues se situent dans les plages des valeurs d'un modèle « acceptable » et « bon » confirmant les observations visuelles. Au regard de ces résultats, le modèle peut être utilisé pour faire la prospection.

### IV.4. Evaluation de l'équilibre entre l'offre et la demande en eau pour l'année de base

#### IV.4.1. Demandes en eau des différents usagers

##### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Au niveau de cette retenue, 57,31 Mm<sup>3</sup> sont sollicités en 2018 dont 89,57 % pour l'AEP soit 51,33 Mm<sup>3</sup> et 10,53 % pour les besoins annexes soit 5,98 Mm<sup>3</sup>.

##### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

La figure 17 présente une vue d'ensemble des demandes en eau autour de la retenue de Loumbila en 2018. Toutes les demandes s'élèvent à environ 65,75 Mm<sup>3</sup> dont 11,66 % est réservé à l'AEP, 87,62 % pour le site agricole et les 0,71 % restant repartis au niveau des autres sites (industrie, cheptel). On remarque que l'agriculture constitue la demande majoritaire sur la période de janvier à mai avec un pic au mois de février. Quant à l'AEP, les demandes en eau restent presque constantes sur toute l'année. Par contre, celles du cheptel et l'industrie sont quasiment négligeables sans oublier la période de non sollicitation (juin à octobre).

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

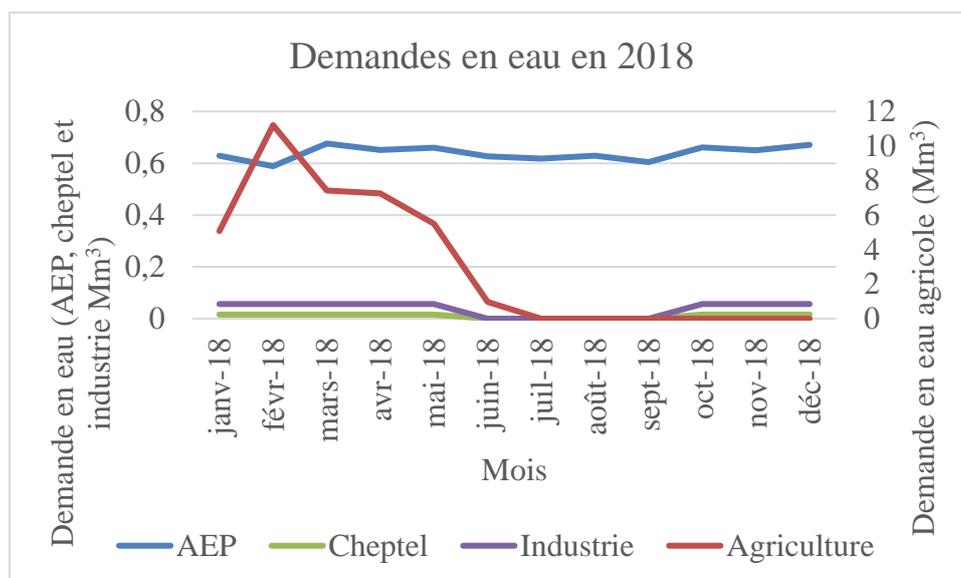


Figure 17 : Demande en eau au tour du barrage de Loubila en 2018

### IV.4.2. Satisfaction des besoins en eau des différents usagers

#### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Le graphique 1 présente le niveau de satisfaction des besoins en eau au niveau du barrage de Ziga en 2018. Ce graphe montre que toutes les demandes autour de cette retenue sont totalement satisfaites.



Graphique 1 : Satisfaction des besoins en eau en 2018 (barrage de Ziga)

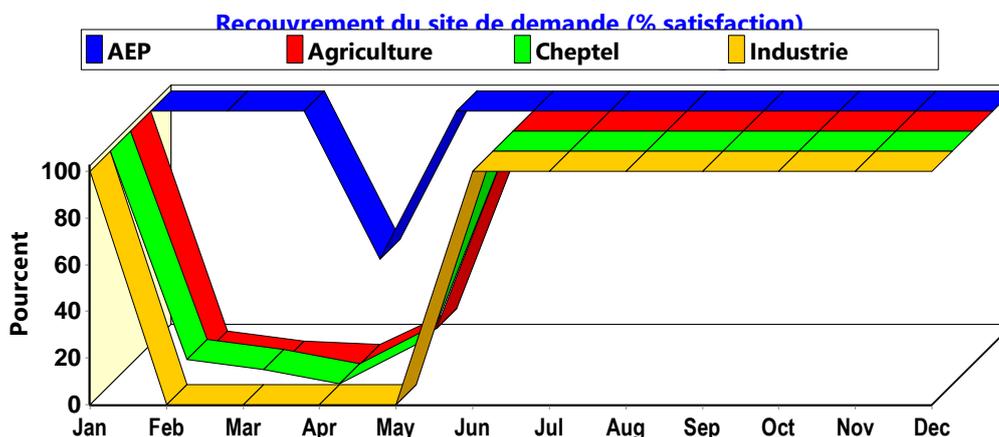
#### ❖ Au niveau du barrage de Loubila

Le graphique 2 montre le niveau de satisfaction des besoins en eau autour du barrage de Loubila en 2018. D'après ce graphique, l'AEP présente un taux de satisfaction de 37 % soit un déficit de 63 % au mois d'avril. En ce qui concerne les autres sites de demandes, le déficit s'étend sur la période de février à mai. Durant ces mois, on note 0 % de satisfaction au niveau du site industriel. Par contre, au niveau de l'agriculture et du cheptel, on observe respectivement

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

6 % et 10 % de couverture en février, 1 % et 7 % en mars, 0 % en avril pour les deux sites, enfin 15 % et 17 % en mai. On remarque donc que le secteur industriel est le plus affecté dû à son ordre de priorité d'allocation élevé. Aussi, le cheptel est mieux satisfait par rapport à l'agriculture malgré qu'il ait la même priorité. Cela est lié à la quantité d'eau sollicitée au niveau de chaque site.

Ces déficits observés s'expliquent par le fait que toutes les demandes (65,75 Mm<sup>3</sup>) en eau dépassent la capacité de la retenue. Or, en dehors de l'AEP toutes les autres sollicitations au tour de la retenue sont réparties uniquement sur la période sèche où il n'y a pas d'apport d'eau pluviale. De plus, le barrage a enregistré de faibles volumes sur la période de janvier à juin dû à la baisse de la pluviométrie en 2017 par rapport à 2015 et 2016 comme l'indique le calcul des indices pluviométriques et la courbe de validation (retenue de Loumbila).



Graphique 2 : Taux de satisfaction des besoins sur le compte actuel Loumbila

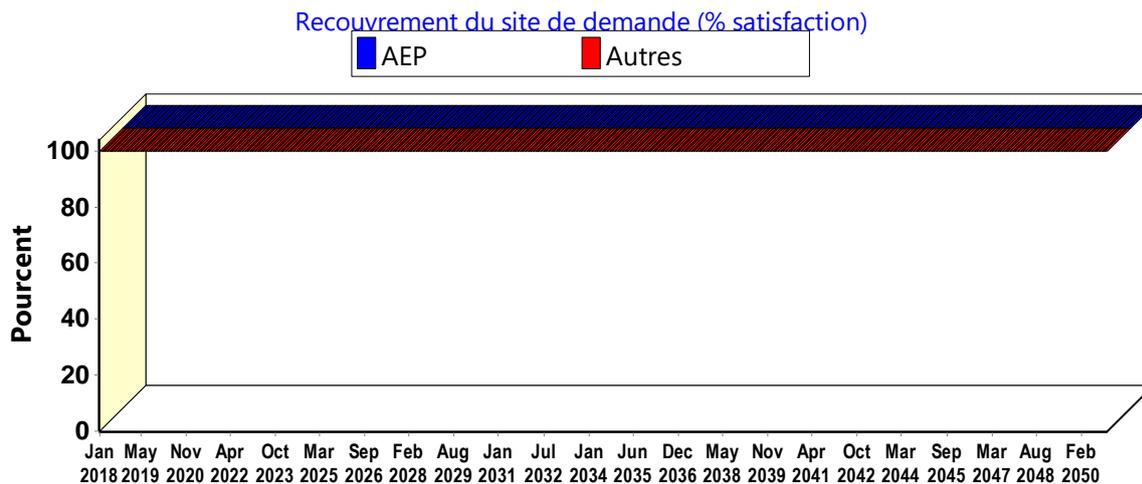
### IV.5. Analyse des résultats des scénarii

#### IV.5.1. Scénario de référence

##### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Le graphique 3 présente la situation de référence au niveau du barrage de Ziga. On remarque que tous les besoins sont satisfaits jusqu'en 2050.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



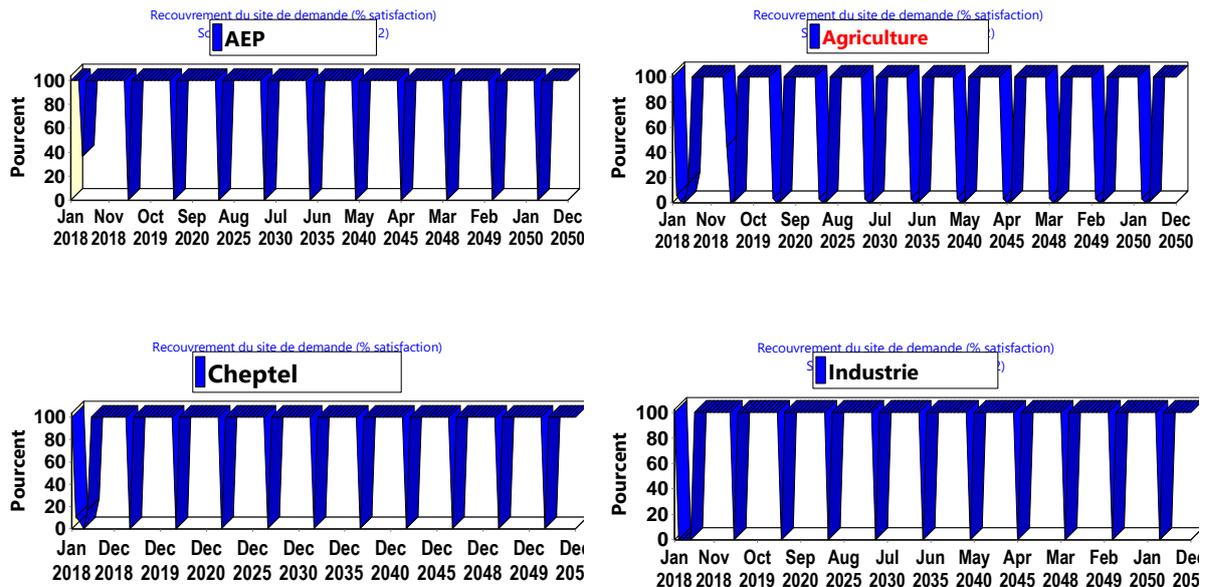
**Graphique 3 : Taux de satisfaction des besoins autour du barrage de Ziga dans le scénario de référence**

### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

Le graphique 4 montre la satisfaction des besoins en eau autour du barrage de Loumbila dans le scénario de référence. En 2018, les déficits sont dans le compte actuel comme indiqués précédemment. À partir de 2019, au mois d'avril tous les sites présentent 0 % de couverture sauf l'agriculture qui, en plus de ce mois n'est satisfait que de 3 % et 1 % dans les mois de mars et mai respectivement. Cet écart entre les taux de satisfaction de l'année 2018 et ceux des autres années (2019 à 2050) est dû au fait qu'au débit des simulations, le modèle a tendance à sous-estimer les volumes puis se coïncide avec les observations dès le mois de mai (Figure 16). Ainsi, le déficit occasionné chaque année est de 31,35 Mm<sup>3</sup>, toutes demandes confondues.

Ces déficits sont dus à l'importance du volume sollicité par les sites. Par ailleurs, on remarque que cette insuffisance n'est observée que pendant la saison sèche. Et dès que la saison pluvieuse s'installe, on a une couverture totale de toutes les demandes. Ceci est dû à l'effet de la hausse de la température, responsable de l'évaporation d'une quantité importante du volume d'eau à la surface des plans d'eau.

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



**Graphique 4 : Taux de satisfaction des besoins autour du barrage de Scénario de référence**

### IV.5.2. Scénario d'augmentation de la population

#### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Le graphique 5 présente le niveau de satisfaction des besoins en eau autour du barrage de Ziga avec l'augmentation de la population. Ce graphe montre que tout comme le scénario de référence, toutes les demandes sont satisfaites jusqu'en 2050. Certes l'augmentation de la population a accru les demandes en eau de façon exponentielle allant de 53 Mm<sup>3</sup> (2018) à 246 Mm<sup>3</sup> (2050) mais pendant la saison pluvieuse le volume prélevé est continuellement remplacé et donc ces prélèvements n'auront pas d'effet sur la quantité d'eau dont disposera le barrage en saison sèche.

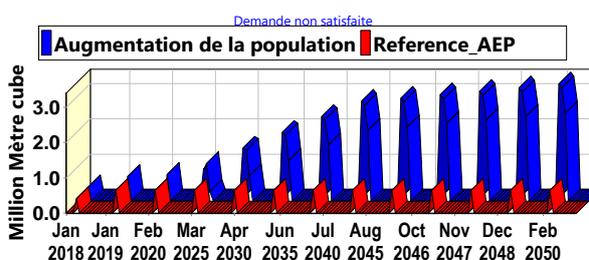
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



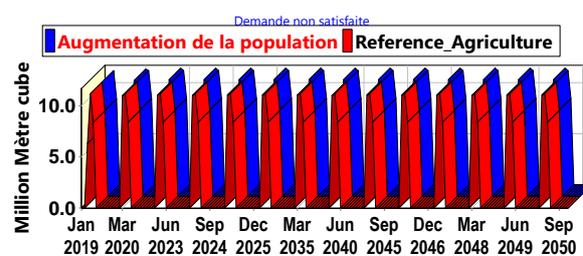
**Graphique 5 : Taux de satisfaction avec l'augmentation de la population (Barrage de Ziga)**

### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

Le graphique 6 présente les demandes en eau non satisfaites au niveau de la retenue de Loumbila avec l'augmentation de la population. Chaque sous-graphique montre l'écart entre la demande non satisfaite du scénario d'augmentation de la population et celle du scénario de référence. En effet, l'augmentation de la population accroît la demande en eau pour l'AEP de 7,67 Mm<sup>3</sup> (2018) à 37,68 Mm<sup>3</sup> (2050). Cette hausse de la demande a eu un important impact dans la satisfaction des besoins en eau au niveau de tous les secteurs. En ce qui concerne l'AEP, elle augmente d'une année à une autre et atteint son pic au mois d'avril (graphique 5, a). Le déficit passe alors de 1 Mm<sup>3</sup> (en 2018) à 8 Mm<sup>3</sup> (en 2050). Au niveau de l'agriculture (graphique 5, b), on a une variation de 15 à 37 Mm<sup>3</sup> soit un écart de 22 Mm<sup>3</sup> par rapport au scénario de référence. Pour le cheptel et l'industrie (graphique 5 c, d), les demandes non satisfaites sont peu comparativement à celles de l'AEP et l'agriculture. L'écart varie presque de la même façon sur toute l'échéance du projet et est à l'ordre de 0,31 Mm<sup>3</sup> et 1,14 Mm<sup>3</sup> respectivement.

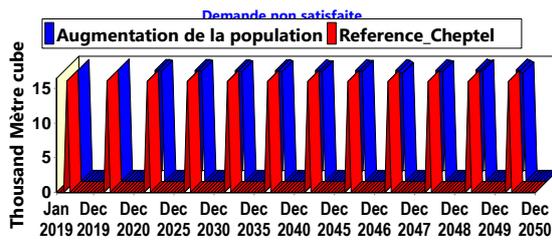


a) AEP

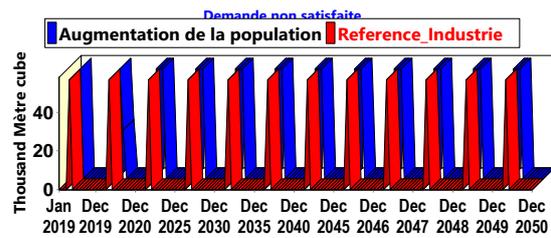


b) Agriculture

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



c) Cheptel

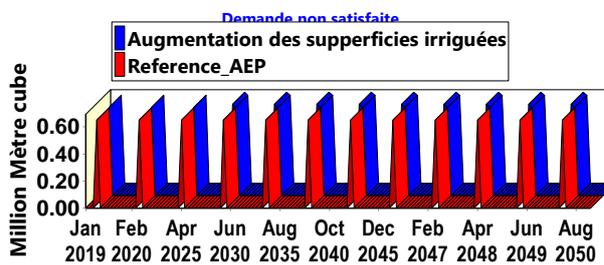


d) Industrie

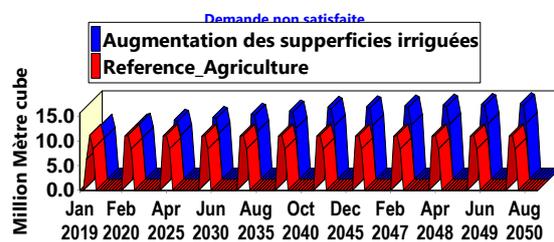
**Graphique 6 : demande non satisfaite avec l'augmentation de la population (Barrage de Loumbila)**

### IV.5.3. Scénario d'augmentation des surfaces irriguées

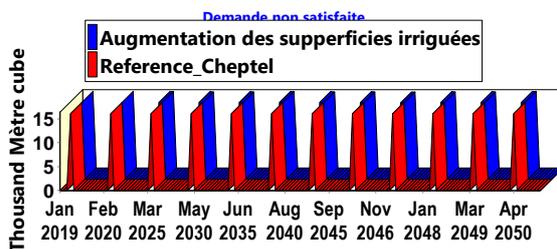
Le graphique 7 présente les demandes en eau non satisfaites avec l'augmentation des superficies irriguées. On remarque une légère augmentation des demandes non satisfaites des sites tels que l'AEP, le cheptel et l'industrie. Pour l'AEP, le déficit est passé de 0,65 Mm<sup>3</sup> (2018) à 1,33 Mm<sup>3</sup> (2050). Au niveau du cheptel et l'industrie on a respectivement un écart de 0,16 et 0,57 Mm<sup>3</sup> de demandes non satisfaites. Par contre, au niveau de l'agriculture le déficit augmente au fil des années avec un écart de 23 Mm<sup>3</sup> en 2050 par rapport au scénario de référence.



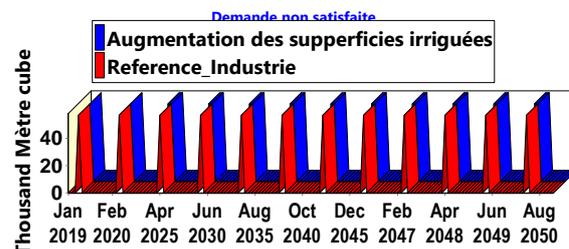
b) AEP



b) Agriculture



c) Cheptel



d) Industrie

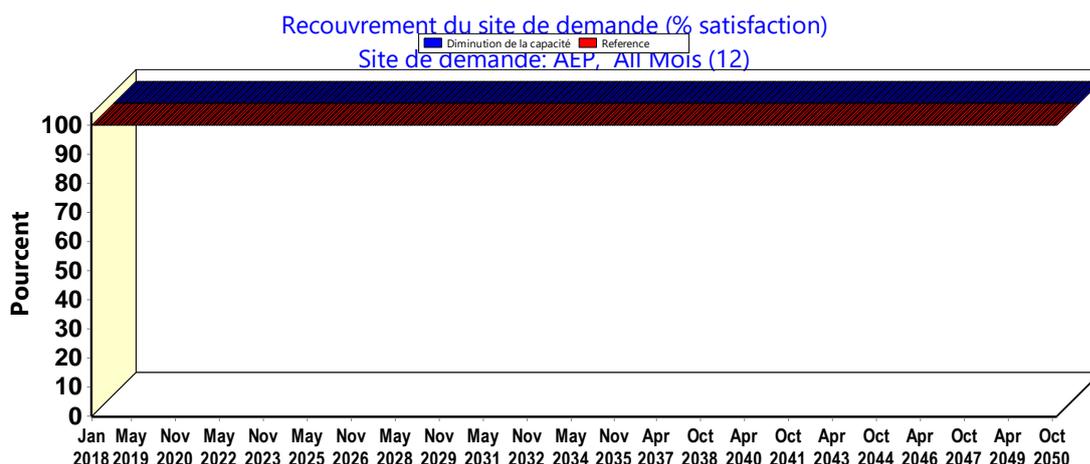
**Graphique 7 : demande non satisfaite avec l'augmentation des périmètres irrigués (Barrage de Loumbila)**

### IV.5.4. Scénario de diminution de la capacité des retenues

#### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

Le graphique 8 présente le niveau de satisfaction des demandes en eau autour de la retenue de Ziga en considérant la perte de capacité due à l'ensablement. Les résultats montrent que toutes les demandes sont totalement satisfaites jusqu'à l'horizon du projet malgré la diminution progressive de la capacité de stockage de la retenue due au ruissellement des sédiments. Ceci parce la capacité de la retenue est évaluée à environ 100 Mm<sup>3</sup> largement suffisante pour satisfaire les besoins actuels de la population (53 Mm<sup>3</sup>)



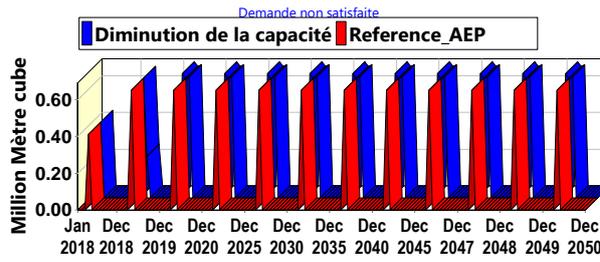
### Graphique 8 : : Taux de satisfaction avec la diminution de la capacité (Barrage de Ziga)

#### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

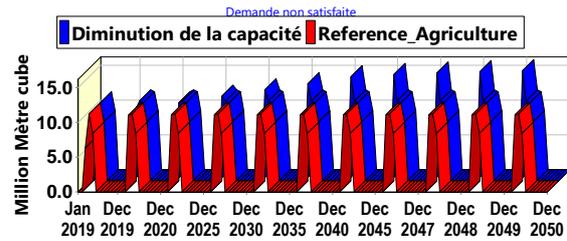
Le graphique 9 présente la satisfaction des besoins en eau au tour de la retenue de Loumbila lorsque l'on considère l'ensablement. Au niveau de l'AEP (graphique 8, a), le déficit induit augmente légèrement d'une année à une autre dont l'écart est d'environ 2 Mm<sup>3</sup> en 2050 par rapport au scénario de référence. Par contre au niveau de l'agriculture (graphique 8, b), l'écart est de 31 Mm<sup>3</sup>. Pour le cheptel et l'industrie, on observe les mêmes variations que dans le scénario d'augmentation de la population.

Ces taux d'insatisfaction observés témoignent de la menace que présente ce barrage à cause des nombreuses activités menées autour. On remarque d'ailleurs que le site agricole est le plus touché par les pénuries. Ceci parce que, non seulement ces activités sont pratiquées en saison sèche, mais aussi avec l'ensablement en 2018, la capacité de la retenue revient à 29.9 Mm<sup>3</sup> ; ce qui est largement inférieur au volume sollicité par le secteur agricole (58 Mm<sup>3</sup>). D'ailleurs d'ici 2050, les retenues perdront prêt de 50 % de leur capacité (annexe 10). Ce qui confirme l'hypothèse 2.

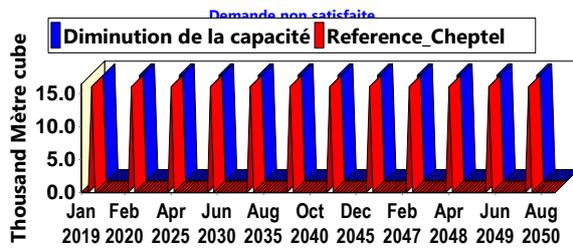
# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)



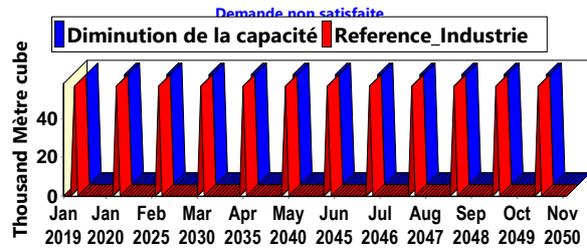
a) AEP



b) Agriculture



c) Cheptel



d) Industrie

**Graphique 9 : Taux de satisfaction des besoins avec la diminution de la capacité de la retenue (Loubila)**

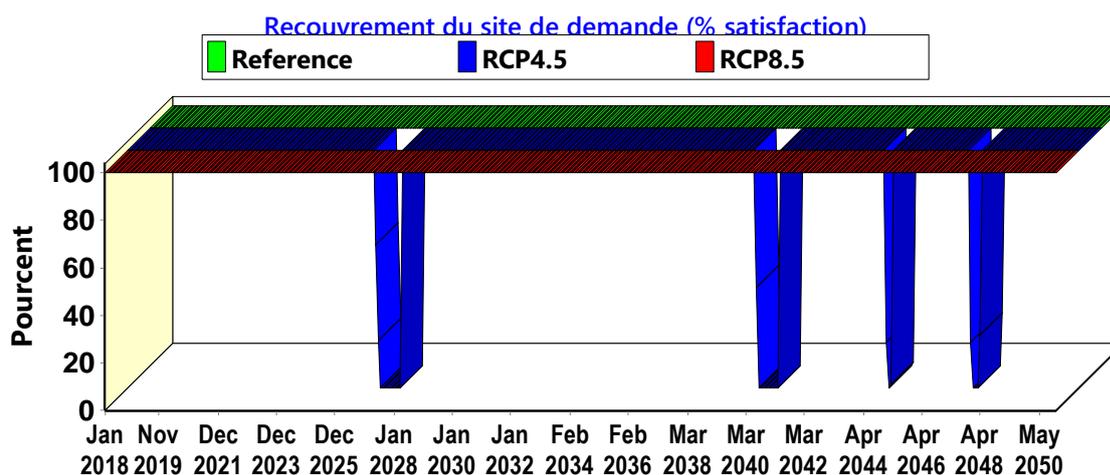
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

### IV.5.5. Scénario de changement climatique

#### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Le graphique 10 présente le taux de couverture des besoins en eau des populations lorsqu'on considère les effets du changement climatique au niveau de la retenue de Ziga. Ce graphique montre une satisfaction totale des besoins en eau avec le scénario RCP8.5 par contre avec le RCP4.5, on observe quatre périodes de pénuries notamment de septembre 2026 à juin 2027, d'octobre 2039 à juillet 2040, d'avril à juin 2044 et de mars à juillet 2047. Ces résultats témoignent de la rareté de la ressource en eau sous l'effet du changement climatique comme l'ont montré les études précédentes (Bougma, 2019 ; Neyra, 2020 ; Saouto, 2016).

De ces résultats il ressort que le scénario RCP4.5 a engendré plus de déficit comparé au RCP8.5. Ceci est en conformité avec les résultats de Ouedraogo (2020). Par ailleurs, les périodes de pénuries décelées corroborent les résultats du MECV (2010) où il est démontré que la pluviométrie baisserait dans les années 2025 et 2050 dans le bassin de Ziga à Wayen. Il faut noter également que la hausse de la température intensifie la désertification qui, associée à l'augmentation des zones irriguées et des sols nus, augmentent la vitesse des écoulements et favorise donc le remplissage rapide des retenues. Ces facteurs pourraient expliquer le fait que le scénario RCP8.5 ait donné des résultats plus optimistes par rapport au RCP4.5 car le premier émet plus de GES et donc contribue plus au réchauffement climatique.



**Graphique 10 : Taux de satisfaction des besoins en eau avec les effets du changement climatique (Barrage de Ziga)**

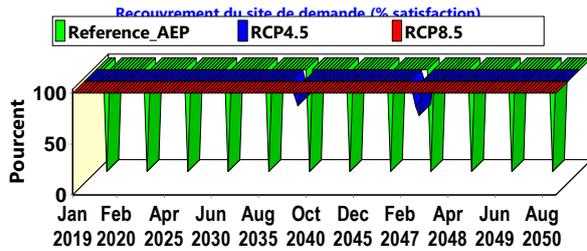
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

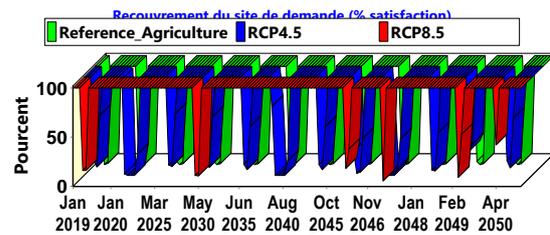
Le graphique 11 présente le taux de couverture des besoins en eau lorsqu'on considère les effets du changement climatique au niveau de la retenue de Loumbila. Les sous-graphiques présentent l'effet du changement climatique sur la couverture des besoins en eau respectivement pour l'AEP, l'agriculture, le cheptel et l'industrie. Les deux scénarii montre qu'il a eu une amélioration par rapport aux scénarii de référence pour tous les sites de demandes. Avec le RCP8.5, on a une satisfaction totale pour tous les sites en dehors de l'agriculture qui présente des déficits en 2019, 2030 et de 2046 à 2050 excepté en 2048. Par contre, avec le RCP4.5 trois périodes marquantes se dégagent. Il s'agit des années 2020, 2040 et 2047 où les taux de couvertures chute à 1 % et 0 % sur la période de février à avril pour le cheptel et l'industrie. Pour l'AEP, on a une légère diminution du taux de couverture en 2040 et 2047 sur la période de mars à mai dont respectivement 76 % et 67 % comme taux minimal.

De ces résultats il ressort que contrairement à la retenue de Ziga, le changement climatique a plutôt eu un effet positif sur la situation de remplissage de la retenue de Loumbila. Cela peut être lié d'une part à l'importance de la pente du bassin de Loumbila par rapport à celle de Ziga (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et d'autre part, au fait que le bassin versant de Ziga soit situé dans la zone sud-sahélienne (Figure 2) et donc reçoit moins de précipitations par rapport à celui de Loumbila dont une partie est située dans le nord-soudanien. De plus, lorsqu'on se base sur le problème de désertification évoqué plus haut, la retenue de Loumbila se remplira plus vite par rapport à celle de Ziga lié non seulement à la grandeur du bassin versant mais aussi à sa forme plus allongée (**tableau 5**). En effet, plus un bassin est allongé, plus le temps de concentration augmente et avec la forte évaporation, certains écoulements risquent de ne pas arriver à l'exutoire. Ainsi, la petitesse du bassin de Loumbila explique son remplissage rapide sans oublier les probabilités d'épisodes d'inondations.

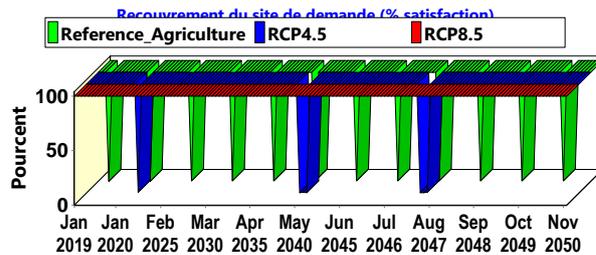
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



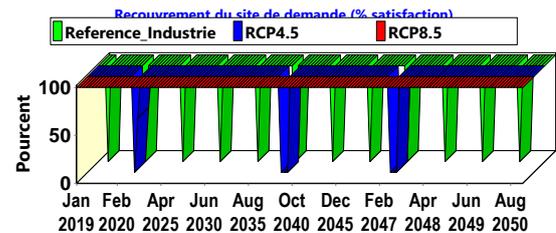
a) AEP



b) Agriculture



c) Cheptel



d) Industrie

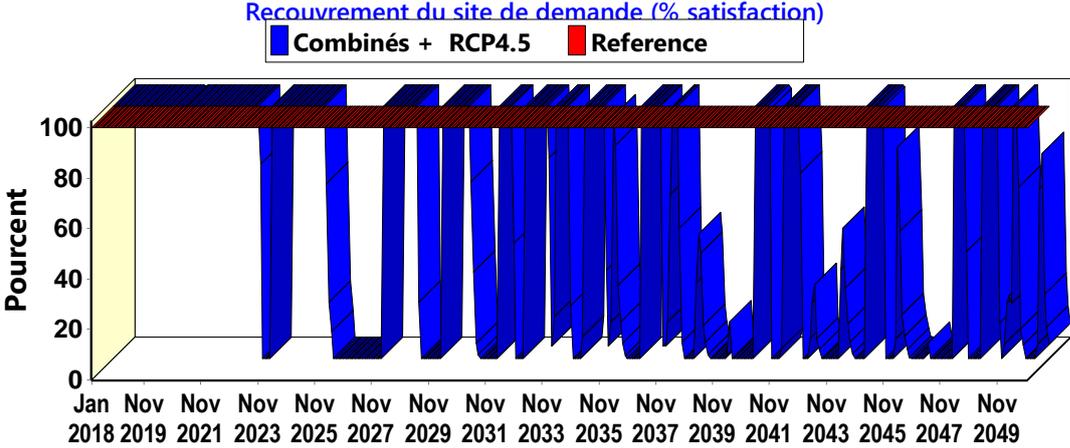
**Graphique 11 : Taux de satisfaction des besoins en eau avec les effets du changement climatique (Barrage de Loumbila)**

### IV.5.6. Combinaison des scénarii

#### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

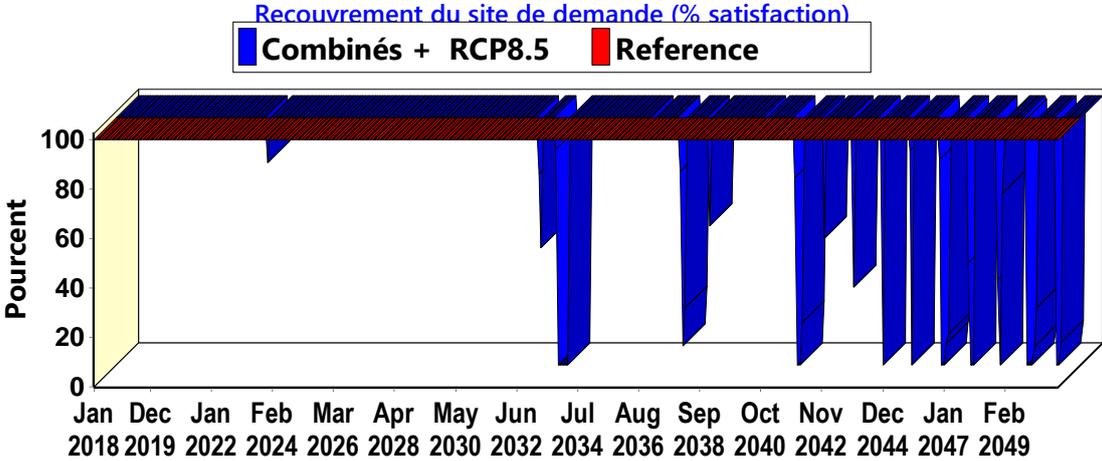
Les graphiques 12 et 13 montrent l'effet combiné de l'augmentation de la population, de la diminution de la capacité de la retenue avec respectivement le RCP4.5 et le RCP8.5 au niveau du barrage de Ziga. Les deux scénarii ont induit de grandes perturbations dans la satisfaction des besoins en eau par rapport au scénario de référence mais encore plus accentuées avec le RCP4.5. En effet, avec ce dernier, le déficit est très important surtout sur les périodes de pénuries mentionnées dans le scénario de changement climatique. Dès 2023, la pénurie s'étend sur la période de mai à juin puis en 2025, on a une chute du taux de couverture à l'ordre de 69 %, 22 % et 11 % respectivement de juillet à septembre. Mais à partir du mois d'octobre on observe 0 % jusqu'en juin 2027. Ce qui montre qu'en 2026, aucune couverture n'est observée et donc cette année représente l'année la plus défavorable dont le déficit est de 92 Mm<sup>3</sup>.

**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)**



**Graphique 12 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii et le RCP4.5 (barrage de Ziga)**

Avec le RCP8.5, en 2023 on a 82 % de satisfaction. On note également que l’année 2033 constitue l’année la plus défavorable où nous avons 87 % en janvier et 0 % de février à juin soit un déficit de 60 Mm<sup>3</sup>. De façon générale, à partir de 2032 les fluctuations deviennent de plus en plus importantes et plus fréquentes sur la décennie de 2040. Ceci est lié non seulement à l’augmentation croissante de la population mais aussi la capacité de la retenue réduite à 100 Mm<sup>3</sup> sous l’effet de l’ensablement.

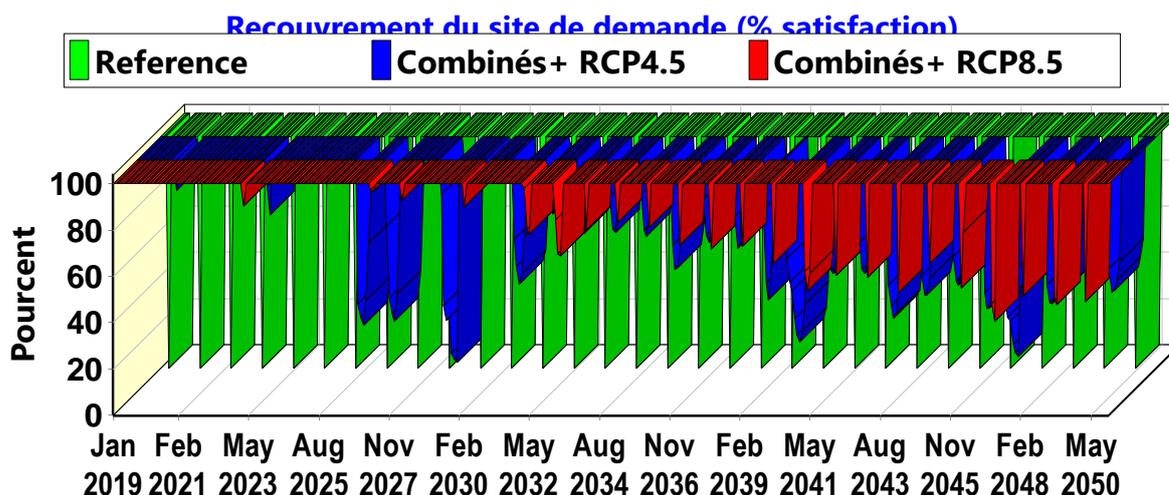


**Graphique 13 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii et le RCP8.5 (barrage de Ziga)**

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### ❖ Au niveau du barrage de Loumbila

Le graphique 14 montre les variations du taux de couverture des besoins en eau pour l'AEP au niveau du barrage de Loumbila lorsqu'on combine les effets du changement climatique avec l'ensablement, l'augmentation de la population et des superficies irriguées. Ce graphique montre des fluctuations des taux de couvertures quel que soit le scénario considéré. Malgré le fait que ces taux ne descendent pas jusqu'à 0 %, ils demeurent plus importants par rapport au scénario de référence. Avec le RCP4.5 on a une variation allant de 99 % à 15 % respectivement en 2020 et 2047. Il faut noter que du mois de mars 2046 au mois de juillet 2047, le taux maximal observé est de 82 %. Sur cette période le déficit est de 28 Mm<sup>3</sup> contre 1 Mm<sup>3</sup> avec le scénario de référence. Pour le RCP8.5 le déficit commence en 2026 où on a 97 % de couverture en avril et mai et 2046 constitue l'année la plus défavorable dont le déficit est de 15 Mm<sup>3</sup>.



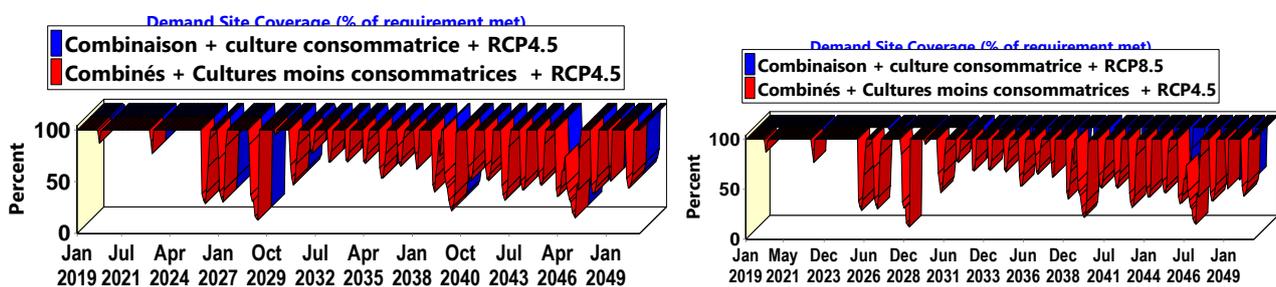
Graphique 14 : Couverture des besoins avec la combinaison des scénarii ( barrage de Loumbila)

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### IV.6. Proposition de stratégies pour une gestion durable des retenues d'eau de Ziga et Loumbila

#### IV.6.1. Utilisation des spéculations moins exigeantes en eau

Le graphique 15 présente les taux de couverture des besoins pour l'AEP si on utilise des cultures moins exigeantes en eau. On remarque que malgré le changement de la variété de riz, les fluctuations restent presque les mêmes que précédemment. En effet, sur toutes l'échéance du projet, on observe une amélioration d'environ 2 % et 6 % respectivement avec le RCP4.5 et le RCP8.5. On en déduit donc que l'utilisation des cultures moins exigeantes à elle seule ne suffit pas pour améliorer les niveaux de satisfaction des besoins.



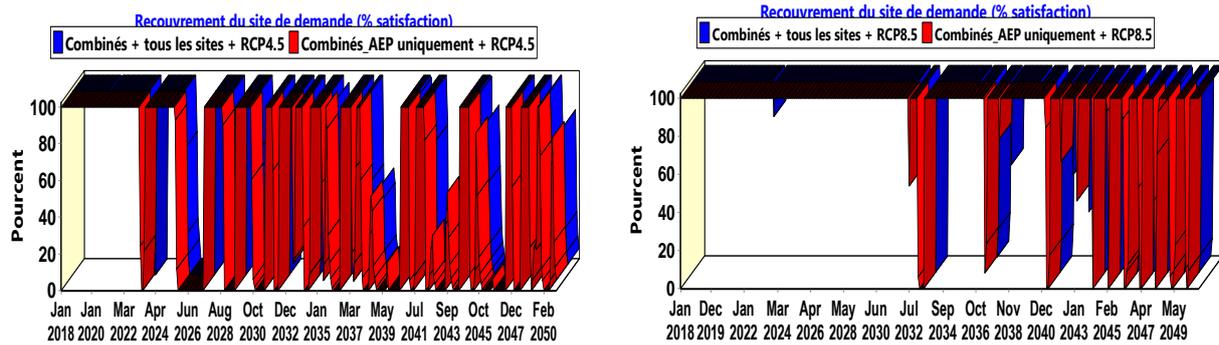
Graphique 15 : Couverture des besoins en eau avec l'utilisation des cultures moins consommatrices d'eau

#### IV.6.2. Suppression de tous les sites de demandes hormis l'AEP

##### ❖ Au niveau du barrage de Ziga

Le graphique 16 présente les taux de satisfaction des besoins en eau autour de la retenue de Ziga lorsqu'on supprime les besoins annexes. On remarque que cette suppression n'a pas eu d'effet significative dans la couverture des besoins pour les deux scénarii. Ceci est lié au fait que la quantité d'eau réservée pour les besoins annexes est minime comparativement au déficit à combler.

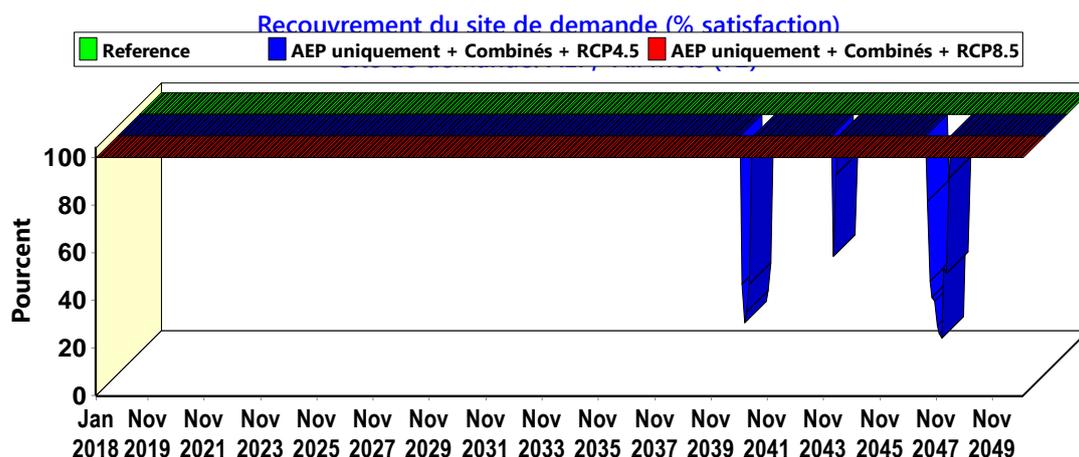
## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)



**Graphique 16 : Couverture des besoins en eau avec suppression des autres sites de demandes (barrage de Ziga)**

### ❖ Au niveau du barrage de Loubila

Le graphique 17 montre les taux de couverture des besoins si l'on proscrie toutes demandes autour de la retenue de Loubila sauf l'AEP. De ce graphique, il ressort que la suppression des autres sites implique une grande amélioration des taux de couvertures des besoins en eau pour l'AEP tant dans le scénario de référence que dans les scénarii climatiques. Avec le RCP8.5, on a une couverture totale jusqu'en 2050. Par contre, le RCP4.5 présente des périodes de pénuries notamment dans les années 2040, 2043, et sur la période de d'octobre 2046 à juillet 2047 mais avec une réduction du déficit d'environ 11 Mm<sup>3</sup> à la période la plus défavorable (2046 à 2047). Les insuffisances observées sont dues non seulement aux effets du changement climatique mais aussi à la hausse des besoins et la diminution de la capacité de la retenue.



**Graphique 17 : Couverture des besoins en eau avec suppression des autres sites de demandes (barrage de Loubila)**

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

### **V. CONCLUSION**

La connaissance des ressources et leur variation dans le temps en fonction des variables socio-économiques est fondamentale dans la planification et gestion efficace des retenues. Les résultats des simulations ont permis de faire un état des lieux de la ressource ainsi que celui des demandes et d'avoir une vision sur l'évolution de ces paramètres. Ainsi, plusieurs scénarii ont été développés dont : l'accroissement de la population, l'augmentation des périmètres irrigués, la diminution de la capacité des retenues, et le changement climatique.

Les résultats obtenus montrent que les ressources en eau des barrages de Ziga et de Loumbila sont soumises à de fortes pressions anthropiques. Le barrage de Loumbila est le plus menacé et présente des taux d'insatisfaction des besoins quel que soit le scénario considéré. En effet, avec l'ensablement, en 2050 ce barrage présente un déficit de 34,45 Mm<sup>3</sup>, toutes demandes confondues par rapport au scénario de référence. L'augmentation des superficies irriguées quant à elle a induit un déficit de 24,38 Mm<sup>3</sup>. Avec l'augmentation de la population, on note une augmentation des besoins en eau d'environ 9 fois en 2050 par rapport aux besoins du compte actuel (2018). Cette hausse de la demande a induit de grandes perturbations dans la satisfaction des besoins de tous les sites dont le déficit est de 30,45 Mm<sup>3</sup>. Pour ce qui est des effets du changement climatique, ils induisent d'énormes pénuries sur toute l'échéance du projet surtout au niveau du barrage de Ziga. La combinaison de tous les scénarii, révèle que la ressource devient rare au fil des années. Dans les années les plus défavorables (2026 et 2046) le déficit au niveau des deux retenues est de 120 Mm<sup>3</sup> pour le RCP4.5 et de 75 Mm<sup>3</sup> pour le RCP8.5.

Ces résultats confirment les hypothèses 1 et 2 selon lesquelles : les barrages perdront 50 % de leur capacité et la ressource disponible ne pourrait plus satisfaire les besoins en eau des populations d'ici 2050 avec l'influence du changement climatique et de la croissance démographique. Par ailleurs, le faible relief et la forme allongée du bassin versant sont autant de facteurs pouvant influencer les écoulements dans les bassins versants. Cela peut être l'une des causes de la rareté de la ressource dans les années à venir.

Les scénarii d'amélioration ne sont pas parvenus à des résultats satisfaisants. Cette situation interpelle donc les autorités en charge de la gestion de ces retenues à réagir au plus vite.

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

### **PERSPECTIVES / RECOMMANDATIONS**

Dans les lignes qui suivent, des suggestions ont été formulées à l'endroit des principaux acteurs de la gestion de ces retenues :

#### **❖ À l'endroit de l'agence de l'eau du Nakanbé en collaboration avec l'État**

- Faire le reboisement autour des retenues afin de réduire la quantité de matières solides au fond de la cuvette ;
- Créer un couloir de circulation des animaux afin de réduire les risques de dégradation et d'ensablement ;
- Mobiliser une nouvelle source d'eau afin de combler les déficits.

#### **❖ À l'endroit de l'ONEA**

- Maintenir le barrage de Ouaga n°3 dans l'alimentation en eau potable de la ville malgré son coût de traitement élevé ;
- Prendre en compte les résultats de cette étude afin d'anticiper les problèmes à venir.

#### **❖ À l'endroit de la DEIE**

- Mettre plus de rigueur dans les mesures des valeurs hydrologiques et l'entretien des stations hydrométriques afin de garantir la bonne information en rapport avec la disponibilité de la ressource.

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

### **BIBLIOGRAPHIE**

- Akpaud, W. A. C. (2007). Analyse des enjeux liés à la gestion de la ressource en eau du barrage de Ziga et perspectives d'un approvisionnement en eau potable adéquat de la ville de Ouagadougou jusqu'en 2025 [Mémoire de master]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p. 69
- Alvarez, U. F. H., TURCOTTE, R., & LACEY, J. (2014). La Gestion Des Réservoirs Du Bassin Versant de la Rivière Du Lièvre, Québec (Canada), Dans Un Contexte de Changements Climatiques : Impacts Et Stratégies D'adaptation [PhD Thesis]. Université de Sherbrooke. p.119.
- Bangash, R. F., Passuello, A., Hammond, M., & Schuhmacher, M. (2012). Water allocation assessment in low flow river under data scarce conditions: A study of hydrological simulation in Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 440, 60-71.
- Batienon, S. I. (2021). Contribution à la Caractérisation hydrologique du bassin versant du MASSILI à GONSE au Burkina Faso à travers une approche multimodèle pluie débit (HEC-HMS, GR4J) [Mémoire de master]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p.77.
- Bikienga, I. M. (2014). Plan National d'Adaptation aux changements climatiques (PNA) du Burkina Faso. Rapport technique, 158.
- Bouzelha, S. (2020). L'agriculture intelligente face au climat. *Journal of the New Economy* Vol, 11(02/P2), 1-22.
- DGAEN. (2020). Mise en place d'un outil technique de gestion de la Ressource en Eau au profit des Comités Locaux de l'Eau (CLE) : Cas du barrage de Loumbila [Rapport de la Direction Générale de l'Agence de l'Eau du Nakanbé (DGAEN)]. p.42.
- DGRE. (2017). Etat des lieux de la qualité des eaux brutes du bassin versant hydrographique du Nakanbé (Burkina Faso) [Rapport technique]. p.131
- Diallo, B. M. L. (2014). Impact de la crue fluviale sur les écosystèmes et les conditions de vie des populations riveraines du Nakanbé (Burkina Faso). 37-43.
- Doumounia, A., Zeba, A., Damiba, L., Zougmore, F., & Nikiéma, M. (2020). Analyse de la variabilité climatique dans le sous bassin de Nouhao au centre-est du Burkina Faso. *Larhyss Journal*, 41, 57-69.
- Droogers, P., Terink, W., Hunink, J., Kauffman, J. H., & Lynden, G. W. J. (2011). Options de gestion de l'eau verte dans le bassin du Sebou, Maroc Analyse avantages-coûts utilisant le modèle WEAP [Rapport technique]. p.42.
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., & Pagé, C. (2009). Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport final du projet RExHySS, Programme GICC, 62.

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

- Fauquez-Avon, S. (2006). L'accès à l'eau pour tous : Un impératif social. *TECHNIQUES SCIENCES METHODES*, 1, 79.
- Fowe, T. (2015). Simulation et Optimisation Du Fonctionnement Du Barrage de Boura Dans La Zone Soudanienne Du Burkina Faso [PhD Thesis]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p.313.
- Guengant, J.-P. (2009). Évolution passée et future de la ville de Ouagadougou. *Peuplement de Ouagadougou et développement urbain*, 42-49.
- 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 [Phdthesis]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. p.246.
- INSD. (2020). Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso : Résultats Préliminaires [Rapport]. Ministère de l'Economie, des Finances et du Développement. p.39.
- Irie, G. R., Soro, G. E., & Bi, T. A. G. (2015). Changements d'états de surface et évolutions spatio-temporelles des précipitations sur le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire) [Performance analysis of few statistical indices to characterize drought conditions in Côte d'Ivoire]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13(2), 386.
- Karambiri, H. (2007). Introduction à la gire : Définition et principes. [Formation]. p.20
- Ki, F. T., Sankara, S. B., Kongo, M., Bakyono, P. D., & Palm, E. M. S. (2013). Capitalisation du processus de mise en place [Rapport technique]. p. 38.
- Lanser, O. (1958). Reflexions sur les debits solides en suspension des cours d'eau glaciaires. *Hydrological Sciences Journal*, 3(2), 37-43.
- Lubès, H., Masson, J. M., Servat, E., Paturel, J.-E., Kouamé, B., & Boyer, J.-F. (1994). ICCARE : Rapport no 3: caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques: étude bibliographique. 22.
- MAHRH. (2011). Cadre d'action pour l'investissement agricole au Burkina Faso[Rapport technique]. p.98.
- MECV. (2007). Programme d'action national d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques (pana du Burkina Faso). Rapport technique, 84.
- MECV, (Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie). (2010). DEUXIEME COMMUNICATION NATIONALE DU BURKINA FASO SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. 2, 66-67.
- MEE. (2001). Etat des lieux des ressources en eau au BF et leur cadre de gestion [Rapport technique]. Ministère de l'environnement et l'eau. p.252.
- Mei, L. (2003). La ressource en eau au Burkina Faso gestion et enjeux. *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 22(1), 37-55.  
<https://doi.org/10.3406/tlgpa.2003.1010>

## **Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

- Morel, A. (1997). L'eau, la ville et l'urbanisme : OUAGADOUGOU [Rapport technique]. p.23.
- Ngom, B. (2010). Développement d'outils de caractérisation et de suivi de l'état écologique et chimique des ressources en eau sur un bassin hydrographique : Cas du bassin du barrage de Ziga [Mémoire de master]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p.77.
- Ouedraogo, A. V. (2020). Modélisation de l'offre et de la demande en eau dans un contexte de changement climatique dans le bassin supérieur du Nakanbé : Application du modèle WEAP à la gestion intégrée des ressources en eau [Mémoire de master]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p.85.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. p.16.
- Pieyns, S., & Klein, J. (1964). Étude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou. Article de revue, 258.
- Reymond, D. (2016). L'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouagadougou : Les relations entre l'Office National de l'eau et de l'assainissement (Onea) et ses partenaires techniques et financiers dans le cadre du projet Ziga I (1983 – 2010) (Rapport technique Recit n°39; p. 78).
- Sawadogo, S. P. (2018). Études techniques détaillées pour la réalisation du barrage de Banwaly dans le département de Padéma, province du Houet, au Burkina Faso [Mémoire de master]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). p.136.
- Shrestha, M., Acharya, S. C., & Shrestha, P. K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, 24(3), 531-539. <https://doi.org/10.1002/met.1655>
- Sircoulon, J. (1982). La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années, 1984, 1972 -1973.
- Thierry, E. (2019). Dossier pédagogique – L'eau et le changement climatique. <https://www.oieau.org/eaudoc/notice/Dossier-p%C3%A9dagogique-%E2%80%93-L%E2%80%99eau-et-le-changement-climatique>. Consulté le 31/07/2021.
- Touré, A. G., Ouedraogo, A. E., & Touré, A. (2015). Les conditions de sécheresse et les stratégies de gestion au Burkina Faso (p. 7).
- Venot, J.-P., Torou, B. M., & Daré, W. (2014). Territorialisation ou spatialisation : Les agences et comités locaux de l'eau au Burkina Faso. *LEspace géographique*, 43(2), 148-163.
- Yonaba, O. R. (2020). Dynamique spatio-temporelle des états de surface et influence sur le ruissellement sur un bassin de type sahélien : Cas du bassin de Tougou (Nord Burkina Faso) [Thèse]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. p.316.
- Zouré, C., Queloz, P., Koïta, M., Niang, D., Fowé, T., Mounirou, A., Yonaba, R., Consuegra, D., Yacouba, H., & Karambiri, H. (2019). Étude des performances hydrologiques des techniques culturales dans un contexte de changement climatique en zone sahélienne du Burkina Faso. Article de revue, 2.

# Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Pourcentage de lacunes des données hydrométriques .....	61
Annexe 2 : Exécution du modèle GR4J .....	61
Annexe 3 : Choix des modèles et calcul de l'ET <sub>0</sub> .....	63
Annexe 4 : Structure du logiciel WEAP .....	68
Annexe 5 : Définition et formules des caractéristiques d'un bassin versant.....	68
Annexe 6 : Besoins en eau des cultures .....	70
Annexe 7 : Demande en eau pour le cheptel .....	70
Annexe 8 : Les prélèvements bruts mensuels de l'ONEA dans les barrages de Loumbila et Ziga en 2018 (m <sup>3</sup> ). .....	71
Annexe 9 : Variation mensuelle des demandes en 2018 (%).....	71
Annexe 10 : Capacités des retenues au fil des années.....	71

ANNEXES

Annexe 1 : Pourcentage de lacunes des données hydrométriques

Années	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Lacunes (%)	34,52	38,36	100	100	100	100	100	38,36	36,99	32,05
Années	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Lacunes (%)	100	22,19	25,48	100	28,77	14,52	100	43,01	42,47	

Annexe 2 : Test de Pettitt

Le test de Pettitt est non-paramétrique et dérive de celui de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans une série (Xi) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (Xi), i allant de 1 à t et t+1 à N appartiennent à la même population. Cette appartenance est testée par la relation

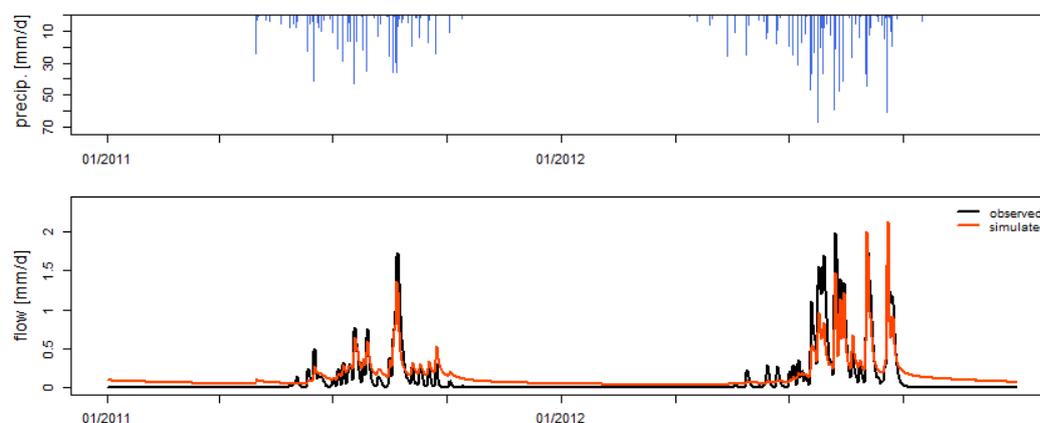
$$\text{suivante : } U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \text{ Avec } D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \text{ et } \text{sgn} = \begin{cases} 1 \text{ si } X > 0 \\ 0 \text{ si } X = 0 \\ -1 \text{ si } X < 0 \end{cases}$$

Le test de Pettitt peut être utilisé pour tester  $H_0: \tau = N$  (non – rupture) contre  $H_1: 1 < \tau < N$  (l'hypothèse alternative) par le maximum de  $K_N$  avec :  $K_N = \max |U_{t,N}|$ .

Pettitt donne la probabilité de dépassement approximative d'une valeur k en utilisant la théorie de rang :  $\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(-\frac{6K^2}{N^3 + N^2}\right)$

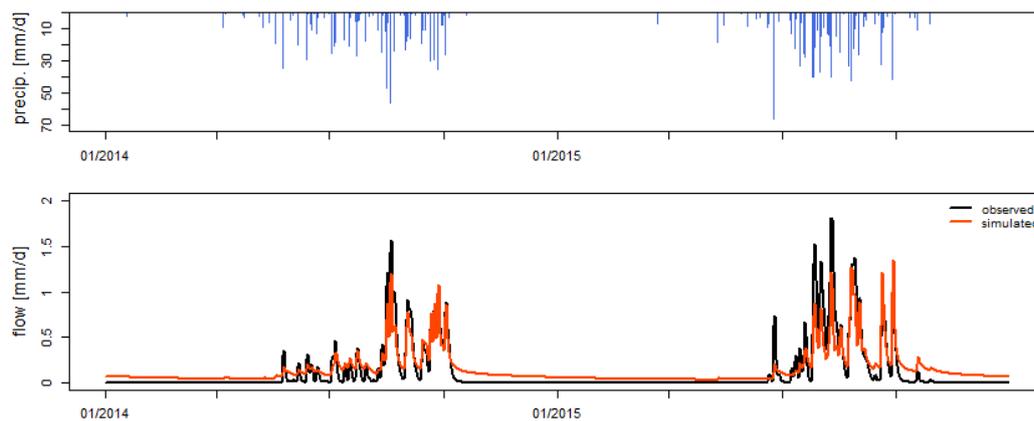
Annexe 3 : Exécution du modèle GR4J

L'hydrogramme des apports d'eau dans la retenue de Ziga pour la calibration du modèle GR4J



L'hydrogramme des apports d'eau dans la retenue de Ziga pour la validation du modèle GR4J

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)



### Critères de performance paramètres du modèle GR4J

	Calage (2011 à 2012)	Validation (2014 à 2015)
Nash	0,81	0,78
X1 (mm)	1721.97	
X2 (mm)	0.23	
X3 (mm)	3.82	
X4 (j)	1.23	

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### Annexe 4 : Choix des modèles et calcul de l'ET<sub>0</sub>

#### ❖ Critères numériques

Les modèles ont été évalués selon trois critères : l'Erreur de Biais Moyen (MBE), l'Erreur Moyenne Absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Pour tous ces critères nous nous sommes fixés une plage de  $\pm 10$  mm/mois afin de retenir les modèles représentant au mieux le climat de notre zone d'étude. Selon MBE, tous les modèles sont retenus mais pour les deux autres critères, les colonnes colorées en bleu représentent les modèles retenus. Les résultats sont présentés aux tableaux suivants.

#### Choix des modèles suivant l'erreur de biais moyen (MBE)

Mois	CanESM2	CSIRO-Mk3	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-LR	CNRM-CM5
<b>Janvier</b>	0.00	0.17	0.40	0.07	0.59
<b>Février</b>	0.83	1.33	-0.12	0.77	0.16
<b>Mars</b>	-0.52	-0.26	-3.44	0.03	-3.47
<b>Avril</b>	13.24	4.02	-17.78	-3.65	-22.06
<b>Mai</b>	2.11	-8.95	-39.48	-20.06	-41.68
<b>Juin</b>	20.56	23.30	-39.12	8.41	-43.99
<b>Juillet</b>	31.78	21.45	-73.42	14.52	-64.12
<b>Août</b>	22.29	12.63	-42.56	1.38	-29.22
<b>Septembre</b>	1.30	6.76	105.94	-4.53	115.84
<b>Octobre</b>	-0.69	-6.82	122.95	-15.32	123.59
<b>Novembre</b>	-0.05	-0.58	31.56	1.10	33.69
<b>Décembre</b>	0.08	0.52	2.97	-0.09	2.80
<b>Moyenne</b>	<b>7.58</b>	<b>4.47</b>	<b>3.99</b>	<b>-1.45</b>	<b>6.01</b>

**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

**Choix des modèles suivant l'erreur moyenne absolue (MAE)**

Mois	CanESM2	CSIRO-Mk3	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-LR	CNRM-CM5
Janvier	0.00	0.17	0.40	0.07	0.59
Février	0.83	1.33	0.12	0.77	0.16
Mars	0.52	0.26	3.44	0.03	3.47
Avril	13.24	4.02	17.78	3.65	22.06
Mai	2.11	8.95	39.48	20.06	41.68
Juin	20.56	23.30	39.12	8.41	43.99
Juillet	31.78	21.45	73.42	14.52	64.12
Août	22.29	12.63	42.56	1.38	29.22
Septembre	1.30	6.76	105.94	4.53	115.84
Octobre	0.69	6.82	122.95	15.32	123.59
Novembre	0.05	0.58	31.56	1.10	33.69
Décembre	0.08	0.52	2.97	0.09	2.80
<b>Moyenne</b>	<b>7.79</b>	<b>7.23</b>	<b>39.98</b>	<b>5.83</b>	<b>40.10</b>

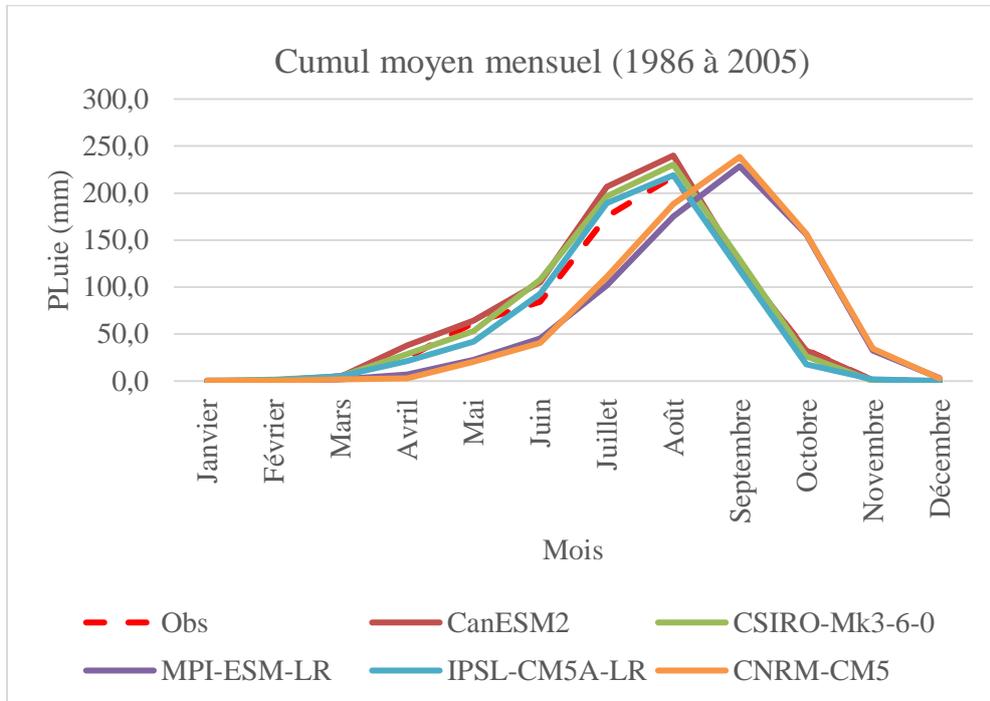
**Choix des modèles suivant l'erreur quadratique moyenne (RMSE)**

Mois	CanESM2	CSIRO-Mk3	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-LR	CNRM-CM5
Janvier	0.00	0.03	0.16	0.01	0.35
Février	0.69	1.78	0.01	0.59	0.03
Mars	0.27	0.07	11.86	0.00	12.08
Avril	175.33	16.19	316.00	13.31	486.67
Mai	4.45	80.02	1558.29	402.38	1737.20
Juin	422.51	542.81	1530.32	70.80	1935.25
Juillet	1009.83	460.04	5390.01	210.79	4111.51
Août	496.98	159.60	1811.07	1.90	853.66
Septembre	1.68	45.71	11223.79	20.56	13419.70
Octobre	0.47	46.51	15115.71	234.72	15273.92
Novembre	0.00	0.34	996.04	1.22	1134.80
Décembre	0.01	0.27	8.80	0.01	7.82
<b>Moyenne</b>	<b>13.27</b>	<b>10.62</b>	<b>56.25</b>	<b>8.93</b>	<b>56.99</b>

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

### ❖ Critères graphiques

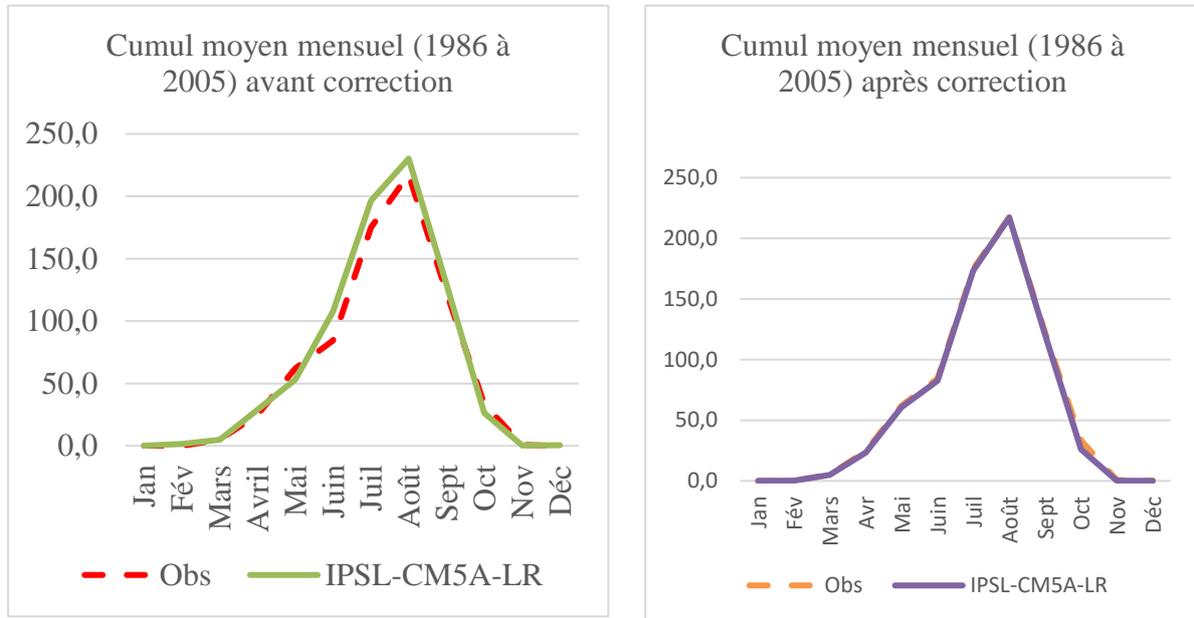
Les cumuls moyens mensuels des précipitations observées et celles simulées par les modèles ont été calculés sur la période de référence (1986 à 2005) et sont représentés à la figure suivante.



## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

### ❖ Choix définitif des modèles

En confrontant les critères numériques et graphiques, nous avons retenus le modèle IPSL-CM5A-LR.



### ❖ Calcul de l'évapotranspiration

La formule de Hargreaves :  $ET_0(mm.jour^{-1}) = 0,0135k_{RS} \times \frac{R_a}{\lambda} \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})(T + 17,8)}$

Avec :

- $k_{RS}$  : Coefficient d'ajustement du rayonnement ( $T^{-0,5}$ )
- $R_a$  : Rayonnement extraterrestre ( $MJ.m^{-2}.jour^{-1}$ );
- $\lambda$  : Chaleur latente de vaporisation ( $2.45 MJ.kg^{-1}$ )
- $T$  : Température moyenne
- $T_{max}$  : Température maximale
- $T_{min}$  : Température minimale

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{SC} d_r [(\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s))]$$

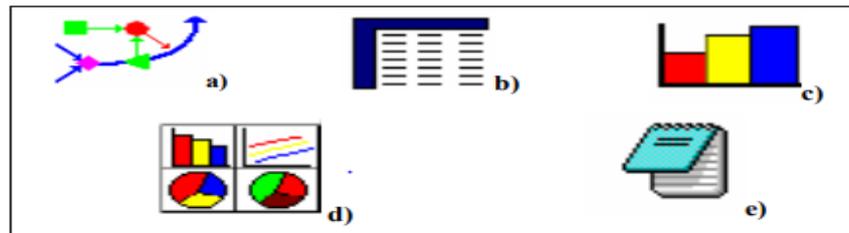
**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)**

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{SC}: \text{Constante solaire } (0,0820 \text{ MJ. m}^{-2}. \text{ min}^{-1}) \\ d_r = 1 + 0,033 \cos \left[ \frac{2\pi}{365} J \right] \text{ (Distance relative inverse Terre – Soleil)} \\ \omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \text{ (angle horaire du coucher du soleil)} \\ \varphi \text{ (rad)} = \frac{\pi}{180} \varphi(\text{degré décimal}) \\ \delta \text{ (rad)} = 0,409 \left[ \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right] \text{ (déclinaison solaire)} \\ J: \text{Nombre de jour de l'année correspondante} \end{array} \right.$$

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)

### Annexe 5 : Structure du logiciel WEAP

WEAP se possède cinq principales présentations : représentation cartographique, a), affichage des données (b), résultats (c), explorateur de scénarios (d), présentation des notes et observations (e). Ces affichages sont présentés par des icônes graphiques sur la « barre d'affichage » située à gauche de l'écran. Ces cinq affichages sont présentés ci-dessous (Fig.



### Annexe 6 : Définition et formules des caractéristiques d'un bassin versant

L'**indice de compacité** permet de définir la forme du bassin. Plus sa valeur est éloignée de 1 plus le bassin est allongé ce qui favorise de faible débit d'écoulement en ce sens que le temps de concentration devient plus important. Il est donné par l'équation 1.

<p><b>Equation 1 :</b> <math>K_G = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}}</math></p>	<p>P : périmètre du bassin versant</p> <p>S : la superficie du bassin versant</p>
--	---

Le **rectangle équivalent** est le rectangle assimilable au bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux en terme d'écoulement. Il se calcul par l'équation 2.

<p><b>Equation 2 :</b> <math>L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2} \right]</math></p> <p>Le choix de cette formule est lié au fait que le coefficient de GRAVELIUS est supérieur à 1,12</p>	<p><math>K_G</math> : Coefficient de compacité de GRAVELIUS</p> <p>S : la superficie du bassin versant</p>
---	--

La **densité de drainage** permet de déterminer la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. En générale de faibles valeurs de densité de drainage sont caractéristiques des sols de forte perméabilité ou avec une couverture végétale importe.

L'**indice global de pente** est obtenu par l'équation 3

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

<p><b>Equation 3 :</b> <math>I_g = \frac{Alt_{5\%} - Alt_{95\%}}{L}</math></p>	<p><b>Alt<sub>5%</sub></b> : Altitude à 5% des surfaces cumulées(m)</p> <p>L : longueur équivalent du bassin(km)</p> <p><b>Alt<sub>95%</sub></b>: Altitude à 95% des surfaces cumulées (m).</p>
--	---

**La dénivelée spécifique** est obtenu par la relation :  $D_s = I_g \times \sqrt{S}$ . Elle définit le relief du bassin versant.

**La Pente moyenne** :  $i_{moy} = \frac{\Delta H}{\sqrt{S}} = \frac{Alt_{plus\ haut} - Alt_{plus\ bas}}{\sqrt{S}}$ . Elle renseigne sur la topographie du bassin et permet de déterminer la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin. Plus la pente est forte, plus le ruissellement des eaux dans les affluents et le cours d'eau principal est rapide.

**La courbe hypsométrique** permet de représenter graphiquement le relief du bassin versant. C'est une répartition de la surface cumulée du bassin en fonction des altitudes.

**Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loubila (Burkina Faso)**

**Annexe 7 : Besoins en eau des cultures**

	<b>BN (mm/mois)</b>	<b>BB (m3)</b>
<b>janvier</b>	169.4	1694
<b>février</b>	373.6	3736
<b>Mars</b>	247.5	2475
<b>Avril</b>	242.1	2421
<b>Mai</b>	183.5	1835
<b>Juin</b>	32.2	322
<b>Juillet</b>	0	0
<b>Août</b>	0	0
<b>Septembre</b>	0	0
<b>Octobre</b>	0	0
<b>Novembre</b>	0	0
<b>Décembre</b>	0	0
<b>Total</b>	1248.3	12483
<b>65% Efficience</b>		19204.6

**Annexe 8 : Demande en eau pour le cheptel**

<b>Espèces</b>	<b>UBT</b>	<b>Consommation journalière (L)</b>	<b>Consommation annuelle (L)</b>	<b>Effectif</b>		<b>Besoin en eau (m3/an)</b>	
				2018	2050	2018	2050
<b>Bovins</b>	0.75	30	6 300	11 121	20 957	70 061	132 032
<b>Ovins</b>	0.08	3.2	672	33 423	117 249	22 460	78 791
<b>Caprins</b>	0.08	3.2	672	22 189	77 842	14 911	52 310
<b>Asins</b>	0.54	21.6	4 536	1 120	2 029	5 080	9 202

## Gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique : cas des barrages de Ziga et Loumbila (Burkina Faso)

### Annexe 9 : Les prélèvements bruts mensuels de l'ONEA dans les barrages de Loumbila et Ziga en 2018 (m3).

Prélèvement en 2018													
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juin	Août	Sept.	Oct.	Nov	Déc.	TOTAL
<b>Loumbila</b>	785419	617425	722420	498507	361620	491227	755752	744722	560525	690896	612866	852020	7693399
<b>Ziga</b>	4517502	4343822	4975805	4994146	5197423	4792768	4455196	4558139	4531987	4886816	4865850	4807664	56927118

### Annexe 10 : Variation mensuelle des demandes en 2018 (%)

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
<b>AEP</b>	Ziga	7.94	7.63	8.74	8.77	9.13	8.42	7.83	8.01	7.96	8.58	8.55	8.45
	Loumbila	8.07	7.50	8.84	8.63	9.15	8.75	8.51	8.40	7.59	8.18	8.02	8.36
<b>Agriculture</b>		13.57	29.93	19.83	19.39	14.70	2.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>cheptel</b>		12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	0	0	0	0	12.5	12.5	12.5
<b>Industrie</b>		12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	0	0	0	0	12.5	12.5	12.5

### Annexe 11 : Capacités des retenues au fil des années

Années	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ziga	163.98	161.98	159.98	149.98	139.97	129.97	119.96	109.96	99.95
Loumbila	29.9	29.64	29.39	28.11	26.82	25.54	24.52	23.24	21.96