

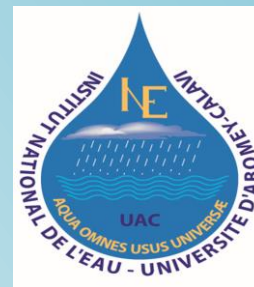
UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI



=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

=====

Mémoire de fin de formation présenté par

ALI Gnonhon Marie-reine

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE PROFESSIONNELLE EN HYDROLOGIE

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DISPONIBILITE EN EAU DU BARRAGE DE DJOUGOU POUR L'AEP

Maître de Mémoire

Dr CHABI Amédée

PROMOTION : 2018

DEDICACE

Je dédie ce travail,

A ma famille, elle qui m'a inculquée une éducation digne, m'a soutenue et encouragée durant ces années d'études.

Particulièrement,

✚ A Mon grand-père Ignace ALI,

Source de vie et d'affection, d'espoir et de motivation, je témoigne mon amour mon respect et ma gratitude pour son grand sacrifice.

✚ A Mes frères Hugues et Emmanuel

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier le Seigneur Dieu tout Puissant de m'avoir accordé la grâce d'entamer et de terminer ce mémoire. Ce travail n'aurait vu le jour sans l'encadrement et les encouragements de maintes personnes. Qu'il me soit permis ici de leur exprimer mes remerciements.

✚ **Dr. Amédée CHABI**, mon maître de mémoire pour avoir accepté de diriger ce travail, malgré ses multiples occupations, pour sa disponibilité et ses conseils. J'exprime ma profonde gratitude. Dieu vous bénisse abondamment.

✚ Ma reconnaissance et mon respect vont à l'endroit du **Professeur Daouda MAMA** et du **Professeur Abdoukarim ALASSANE**, respectivement Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) et Chef du département d'Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

A tout le personnel administratif, technique et le corps enseignant du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et spécialement aux Docteurs, **Djigbo Félicien BADOU**, **Yèkambèssoun N'Tcha M'Po**, **Jean HOUNKPE** et **Rita HOUNGUE**. Je dis merci pour les nombreux efforts que vous faites pour que notre formation soit de qualité et pour vos sages conseils. Puisse Dieu vous accompagner dans chacun de vos projets.

Mes remerciements vont à l'endroit, de mes tantes Lékiatou ATO, et Fouléra ATO pour leur appui et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous les aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie en l'occurrence Félix AMOUS-SOU, et Moderan HOUNKPEATE. A tous mes camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnés tout au long de notre formation, je dis infiniment merci.

A tout le personnel de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), de la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB) et celui de l'Agence Nationale de la Météorologie (Météo Bénin) qui m'ont procuré les données nécessaires au présent travail. J'exprime ma gratitude.

A tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu pour l'aboutissement de ce travail, que ce travail soit perçu comme le fruit de votre soutien infaillible.

RESUME

La question de la disponibilité et d'accès à l'eau est sans aucun doute un des problèmes majeurs auquel devra faire face l'humanité au cours des années à venir. A cet égard, une meilleure connaissance des ressources en eau est primordiale pour une gestion rationnelle et durable. C'est dans ce contexte que l'étude de la variabilité climatique s'avère importante. De ce fait, diverses données et méthodes ont été utilisées. Les indices centrés réduits de Hanning, l'indice de Nicholson appliqués aux séries pluviométriques et hydrologique de 1986 à 2016 ont mis en évidence une variabilité climatique caractérisée par une alternance de phases humides et sèches. La méthode statistique de Lee et Heghinian indique une rupture en 1987 qui marque une modification des régimes pluviométrique et hydrologique. Les résultats du bilan hydrologique indiquent un faible apport d'eau dans la retenue et une forte perte par évaporation soit 51,12% de l'eau mobilisée par le réservoir. Cette hausse de l'évaporation pourrait se traduire par une forte variabilité interannuelle des apports futurs d'eau dans le barrage de Djougou, ce qui entrainera une insuffisance de la ressource en eau pour répondre aux exigences des demandes futures en eau pour les besoins de la population. L'application du logiciel WEAP a montré que la demande en eau potable pour les besoins de la population augmente au fur et mesure que les années passent. Cette augmentation est en fonction du taux d'accroissement.

Mots clés : variabilité climatique, barrage, ressource en eau, bilan hydrologique

ABSTRACT

The issue of water availability and access is undoubtedly one of the major problems that humanity will have to face in the years to come. In this respect, a better knowledge of water resources is essential for a rational and sustainable management. It is in this context that the study of climate variability is important. Therefore, various data and methods have been used. The Hanning centered index, the Ni-cholson index applied to the rainfall and hydrological series from 1986 to 2016 have highlighted a climatic variability characterized by alternating wet and dry phases. The statistical method of Lee and Heghinian indicates a break in 1987 that marks a change in rainfall and hydrological patterns. The results of the hydrological balance indicate a low input of water into the reservoir and a high loss by evaporation, i.e. 51.12% of the water mobilized by the reservoir. This increase in evaporation could result in high inter-annual variability of future water inflows into the Djougou Dam, which will lead to an insufficiency of water resources to meet future water demands for the population. The application of WEAP software has shown that the demand for potable water for the needs of the population increases as the years go by. This increase is a function of the growth rate.

Keywords: climate variability, dam, water resource, water balance

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

- AEP** : Approvisionnement en eau potable
- DG Eau** : Direction Générale de l'Eau
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle
- GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- INSAE** : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
- PNUD** : Programme de Nations Unies pour le Développement
- CCNUCC** : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
- SONEB** : Société Nationale des Eaux du Bénin
- SEI** : Service de l'Environnement Industriel
- WEAP** : Système d'Evaluation et de Planification des ressources en Eau

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques du bassin versant wêwê-Ouémé.....	14
Tableau 2: volume d'eau distribué à la population	16
Tableau 3 : besoin en eau théorique par type de plants	16
Tableau 4:Signification de l'indice de Nicholson	19
Tableau 5: pluviométrie interannuelle à la station de Djougou (1986-2016)	29
ANNEXES	

Tableau 6 : données de la courbe hauteur-volume initial du lac Téro (barrage de djougou).....	I
Tableau 7 :données des évapotranspirations et évaporations annuelles	II
Tableau 8 :demande en eau en fonction de la population actualisée	IV

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la ville de Djougou	11
Figure 2: Plan d'eau du barrage de Djougou.....	13
Figure 3: Courbe Hauteur-Volume initiale du lac Téro	15
Figure 4: Schéma conceptuel de modélisation par WEAP de la station de Djougou	26
Figure 5: indices pluviométriques de Nicholson.....	31
Figure 6: indices pluviométriques du filtre passe - bas de Hanning d'ordre 2.....	31
Figure 7: Variabilité des débits moyens annuels dans le bassin de Wêwê.....	32
Figure 8: Evolution des indices hydrologiques dans le bassin de Wêwê	32
Figure 9: courbes des volumes observés et simulés	34
Figure 10: Evolution mensuelle de la demande et du volume d'eau stocké dans la retenue	35
Figure 11: Evolution de la demande basée sur un taux d'accroissement de la population (3.5%).	36
Figure 12: évolution de la demande en eau pour un fort taux d'accroissement.	36

TABLE DES MATIERES

Dédicace	i
Remerciements.....	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des sigles et Acronymes	v
Liste des tableaux	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Contexte et justification de l'étude.....	2
2. Revue de littérature	3
2.1. Clarification conceptuelle	3
2.2. Etat des connaissances.....	5
3. But de la recherche	8
4. Problème et questions de recherche	8
5. Objectifs du mémoire.....	8
6. Hypothèses de travail.....	8
7. Résultats attendus de l'étude et cibles	9
8. Grande divisions du mémoire	9
CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES.....	10
1.1 Introduction	11
1.2. Milieu d'étude	11
1.2.1. Localisation	11
1.2.2. Géomorphologie et géologie	12
1.2.3. Hydrologie	12
1.2.4. Sols, végétation, climat et hydrographie	12
1.2.5. Quelques aspects socio-économiques	13

1.3 Données utilisées.....	14
1.3.1 Données hydroclimatiques	14
1.3.2 Débits de pompage	14
1.3.3 Les données relatives aux caractéristiques du barrage de Djougou	14
1.3.4 Approvisionnement en eau potable	15
1.3.5 Arrosage pour la pépinière	16
1.3.6 Les données démographiques	16
1.4 Matériels.....	17
1.5 Méthodes.....	18
1.5.1. Contrôle de la qualité des données	18
1.5.2. Méthodes de traitement des données	19
1.6 Conclusion	27
CHAPITRE 2 : RESULTAS ET DISCUSSION.....	28
2.1. Introduction.....	29
2.2 Variabilité hydroclimatiques.....	29
2.2.1 Variabilité interannuelle des précipitations	29
2.2.2 Evolution des indices de précipitations	30
2.2.3 Variabilité hydrologique	31
2.2.4 Evolution des indices hydrologiques	32
2.3 Evaluation de la disponibilité en eau du barrage	33
185.877,41	33
2.4. Modélisation de l'allocation et les besoins en eau de la population.....	34
2.4.1. Impact des prélèvements sur le barrage de Djougou	34
2.4.2 Demande en eau basé sur le taux d'accroissement de la population	35
2.5. Discussion	37
2.6. Conclusion	38
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	39
perspectives et SUGGESTIONS	41

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	42
Annexe I.....	I
Annexe II.....	II
ANNEXE III.....	IV

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification de l'étude

Les changements climatiques sont l'un des phénomènes auxquels le monde est confronté au cours de ces dernières décennies. Ils constituent une très grande menace pour l'environnement et le développement durable. L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre fait monter la température moyenne de la surface du globe. Ce réchauffement de la planète peut être l'une des causes des changements climatiques car il déclenche une modification de la circulation atmosphérique et des autres sous-systèmes climatiques (Bourque, 2000). Les changements climatiques et leurs potentiels impacts sont le reflet du système climatique planétaire dans lequel s'inscrit l'Afrique de l'Ouest. Plusieurs études antérieures ont montré dans cette région que les saisons des pluies et les saisons agricoles deviendront de plus en plus courtes (Ibrahim, 2012 ; Ibrahim et al., 2014 ; Cook et Vizy, 2012) et que les conditions climatiques, arides et semi-arides s'étendront au sahel (Elguindi et al., 2014 ; Sylla et al., 2016a). De telles conditions peuvent produire des contraintes importantes sur la gestion des ressources en eau. Une inquiétude grandissante gagne alors l'opinion publique face aux impacts de ces changements sur les ressources naturelles et particulièrement les ressources en eau. Du fait de l'évolution démographique et de l'augmentation rapide des besoins en eau pour l'AEP, l'agriculture et l'industrie ; la disponibilité, la maîtrise et la gestion des ressources en eau constituent des défis majeurs pour les prochaines décennies surtout pour la région ouest africaine. Pour s'adapter à ce contexte de changements climatiques, nous assistons à une mobilisation importante autour de la thématique des ressources en eau.

Le Bénin n'est pas épargné par les impacts des changements climatiques et ses autres sous-systèmes. Ils subissent des modifications à grande échelle qui restent amplifiées par les facteurs naturels et anthropiques tant régionaux, que locaux. Ainsi, les climats béninois sont sujets à de forte variabilité ou à des changements selon les échelles de temps et d'analyse dont les conséquences restent néfastes pour le développement (PNUD, 2019). Plusieurs chercheurs béninois (Badou, 2016 ; Alamou et al., 2016 ; Blalogoe et al., 2017 ; N'Tcha M'Po, 2018 ; Lawin et al., 2019 ; Houngué, 2020 ; etc.) cité par (HOUKPEATE,2020) ont travaillé sur la variabilité climatique, et

ont noté une variation climatique marquée par une augmentation des températures et une baisse des précipitations suivie d'une légère reprise au cours des années 1990.

Dans la commune de Djougou la question sur la disponibilité de l'eau en quantité et en qualité se pose face aux conditions climatiques évoquées et constitue un défi majeur à relever pour le bien-être des populations. Selon Gangneron (2011), la croissance démographique de ladite commune est de 3% l'an ce qui entraîne des besoins largement élevés en eau potable. Depuis 2006 elle connaît un déficit dans la fourniture en eau potable qui peut être dû à la péjoration climatique ou à la demande en eau qui est devenue beaucoup plus importante que prévue.

Le barrage de Djougou est l'une des sources d'approvisionnement en eau potable des populations dont dispose la ville. Il couvre à lui seul près de 95% des besoins en eau potable de la population, (Honvoh ,2015) et est exploité pour des besoins en eau de la population. Malgré son importance, il est sujet à de nombreuses perturbations surtout pendant les saisons sèches, et a même connu un phénomène de tarissement en 2014 pour des raisons multiples. Vu la difficulté d'accès à l'eau que connaît la ville de Djougou la présente étude se propose donc de rechercher l'impact de la variabilité climatique sur la disponibilité de la ressource de ce barrage pour une meilleure gestion.

2. Revue de littérature

2.1. Clarification conceptuelle

Nous voulons, à travers cette clarification, donner une compréhension claire des termes que nous allons utiliser dans ce travail et auxquels les travaux antérieurs donnent parfois des sens différents.

✓ Variabilité et changement climatique

Les changements climatiques sont considérés comme l'une des menaces les plus graves posées au développement, avec des impacts significatifs sur l'économie des pays en développement et les populations les plus pauvres de la planète.

En général, la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat, alors que les changements climatiques désignent un changement du climat attribué directement ou indirectement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère globale et qui s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables (CCNUCC, 1992).

Ainsi, la notion de variabilités et changements climatiques désigne la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit naturelle ou due aux facteurs d'origine anthropique (Niasse (2004) et al.). Une telle définition a pour avantage de simplifier celle donnée par la Convention -

cadre des Nations unies sur les changements climatiques et aussi de prendre en compte celle du GIEC qui considère le changement climatique comme une variation à long terme du climat, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle.

✓ **Barrage**

Le dictionnaire LAROUSSE définit « les barrages, comme des ouvrages hydrauliques édifiés au travers d'une vallée, qui ont pour objet de retenir, en les accumulant en hauteur, les eaux d'une rivière. Leur objectif primitif et qui demeure toujours essentiel est l'irrigation. Ils peuvent également être utilisés en tant que régulateurs de crues, à des fins énergétiques (production d'énergie hydroélectrique) ou pour l'alimentation en eau potable. Ces différentes fonctions sont souvent associées afin de valoriser un même barrage. Mais, dans la gestion du stock de l'eau, une prépondérance est toujours donnée à l'une d'entre elles. D'autres utilisations, bien que secondaires, sont également à mentionner : usages industriels (rétention d'effluents boueux), navigation, création de polders, de plans d'eau...

Les barrages comptent parmi les constructions humaines les plus anciennes. Leur développement actuel coïncide avec les évolutions démographique et économique, qui imposent, dans la plupart des régions du globe, la construction de réservoirs de plus en plus grands, tant en hauteur qu'en longueur, afin d'assurer de manière continue et régulière les besoins en eau et en énergie des populations, des cultures et des industries. Il est désormais possible, grâce au développement des moyens de recherche et de calcul et aux progrès effectués par les méthodes d'exécution, de réaliser ces ouvrages importants plus rapidement, à moindre coût et avec plus de sécurité. Les grands principes de base sont toutefois restés les mêmes et la distinction entre les différents types de barrage (en béton ou en matériaux meubles) reste valable ».

✓ **Ressource en eau**

La ressource en eau regroupe l'ensemble des eaux disponibles, que l'on peut mobiliser, pour satisfaire en quantité et en qualité une demande donnée en un lieu donné, pendant une période appropriée (Dictionnaire biologique, 2013). Dans le cadre de notre étude la ressource en eau représente l'eau disponible au niveau du barrage de Djougou pour les besoins des populations.

✓ **Bilan hydrologique**

- Selon le Glossaire International d'Hydrologie (1992) le bilan hydrologique est défini comme un bilan d'eau basé sur le principe selon lequel, pendant un certain intervalle de temps, l'apport total dans un bassin versant doit être égal au total des sorties, plus la variation, positive ou négative, de la quantité d'eau stockée dans le bassin ».
- Le Dictionnaire de la Géographie (1984) définit indifféremment « bilan hydrique ou hydrologique » comme une « Etude comparée de la lame d'eau tombée à la surface d'un territoire ou d'un bassin versant et les différentes formes de transfert de cette eau, soit par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines ».
- Le Grand Larousse encyclopédique (1970) définit le bilan hydrique comme étant la comparaison entre les quantités d'eau fournies à une plante et celles utilisées par elle.

Considérant ces définitions sensiblement différentes, on peut retenir que dans tous les cas, c'est l'aspect comptable du terme bilan qui prévaut en hydrologie, que ce soit au niveau du bilan hydrique ou du bilan hydrologique. Trop souvent confondus, ces deux termes sont bien replacés dans leurs domaines respectifs par le Larousse Encyclopédique : le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et concerne un processus hydrologique, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante ou des cultures et relève d'une démarche agronomique.

Simple opérations comptables, bilan hydrique et bilan hydrologique visent tous les deux à établir le bilan entre les entrées et les sorties en eau d'une unité géographique, pendant une période de temps donné.

2.2. Etat des connaissances

L'eau se révèle comme une ressource limitée bien que renouvelable en fonction des saisons. Au cours de ces dernières décennies l'Afrique plus précisément l'Afrique de l'ouest a connu un phénomène de changement climatique qui a eu des répercussions sur les ressources en eau. Nous abordons ici l'état des connaissances sur la gestion des ressources en eau en mettant un accent particulier sur la connaissance de la ressource et la variabilité hydro-climatique à travers une revue bibliographique.

➤ Bibliographique sur la variabilité hydro-climatique

L'étude sur la variabilité climatique fait l'objet d'une attention croissante, aussi bien au plan national qu'international. Nous faisons ici une synthèse de quelques-unes de ces études.

Vissin (1998, 2001) dans ses travaux sur l'impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, a montré que les chroniques de la pluviométrie sur le bassin versant béninois du fleuve Niger ont connu une « rupture de stationnarité » en 1972.

Les changements pluviométriques observés se sont largement amplifiés dans les écoulements et la recharge des sous bassins versants. Il a aussi souligné que les déficits les plus marqués s'observent au cours de la saison des pluies, entraînant des déficits d'écoulements très sensibles. Ainsi, la sécheresse pluviométrique des dernières décennies serait responsable de la sécheresse hydrologique enregistrée dans le bassin.

En Côte d'Ivoire, dans le Degré Carré de Grand-Lahou (Soro et al, 2011) ont effectué une étude sur la variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau. Il ressort de cette étude que les méthodes statistiques appliquées aux séries pluviométriques et hydrologiques indiquent des ruptures entre 1966 et 1981. Ces ruptures marquent une modification des régimes pluviométriques et hydrologiques s'accompagnant ainsi d'une diminution de la pluviométrie de 13 à 28 % et de l'écoulement du Bandama de 58%. Ce qui permet de conclure que les manifestations de la variabilité climatique ont une répercussion sur les ressources en eau. Baudet et al, (2017) dans leurs travaux sur la variabilité spatio-temporelle des séries climatiques et hydrologiques dans le bassin versant du Sebou (Maroc) ont montré que le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles avec une succession de périodes sèches et humides au cours de la période de 1939 et 1979 et une baisse générale des précipitations sur toute la région étudiée à partir des années 80. Ces mêmes auteurs ont également montré que les chroniques hydrologiques ont connu une rupture en 1978 et 1972 respectivement à Mechra Bel Ksiri et M'jara et à Azib Es Soltane ce qui a entraîné un déficit au niveau du Sebou.

➤ **Bibliographique sur la gestion et connaissance de la ressource eau**

Avec la croissance démographique et l'urbanisation de plus en plus grandissante, la demande en eau de la population des pays en développement, continue de croître et de se diversifier, dans un contexte de changement climatique caractérisé par une raréfaction de la ressource (Chabi,2019).

Le terme de gestion des ressources en eau est fréquemment compris comme une utilisation rationnelle de l'eau. Selon Tazi (1998), l'eau est multidimensionnelle, complexe et en interaction avec

d'autres ressources naturelles, les différents milieux et les communautés. Elle est donc une ressource multidimensionnelle dont les aspects sont variables lors des différentes étapes de son perpétuel cycle. Alors, une meilleure gestion doit prendre en compte toutes les étapes du cycle de l'eau compte tenu de leur interdépendance et de l'unicité même de la ressource en eau. Les interactions entre les différentes phases sont profondes mais leurs caractéristiques sont très différentes et doivent être bien comprises pour apprécier les spécificités d'une gestion durable des eaux (Martin, 1996). La gestion de l'eau doit donc prendre en compte la gestion des eaux pluviales, des eaux souterraines et des eaux de surface. Etant donné les bienfaits que nous procurent les eaux de surface sur le plan social, économique et environnemental il est du devoir de tous de s'assurer de leur intégrité écologique et de leur gestion. Cependant de nombreuses études menées jusqu'à ce jour sur de nombreux plans et cours d'eau ont montré que non seulement leur intégrité écologique mais aussi leur survie est menacée. Par exemple, Kouamé (2010) lors d'une étude réalisée sur l'optimisation pour l'exploitation des barrages dans le nord du Burkina Faso qui a porté sur celui de Guitti, a constaté qu'un grand nombre de barrages présente un déficit de satisfaction des besoins en eau des usagers. Cette situation est peut-être due à la raréfaction des pluies ; aux températures élevées et au problème d'ensablement qui résulte des pratiques exacerbées par l'homme autour de ceux-ci. Une autre étude réalisée dans le même pays par Razanamahandry (2013), sur l'élaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles, affirme que les barrages sont exposés à plusieurs autres problèmes tels que la sédimentation qui entraîne environ 1% de perte de la capacité de stockage de ceux-ci, l'accroissement des prélèvements pour le maraîchage et l'élevage qui entraînent la diminution de la quantité d'eau des retenues. Il faudra alors réduire les consommations et changer de pratiques. Fowe, (2009) dans le cadre d'une étude sur la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du lac municipal de Dschang (Cameroun) a constaté qu'il n'existe pas de réseaux de suivi continu des ressources en eau dans le bassin versant du lac. Le suivi de la qualité des eaux du lac fait sur une période d'un an (juillet 2007-juin 2008) a été commandité dans le cadre du projet d'aménagement touristique-culturel du site du lac. De plus plusieurs problèmes liés à la connaissance et aux usages des ressources en eau ont été identifiés. Il s'agit de l'absence des stations de mesure limnométriques et hydrométriques, le manque de suivi d'indicateurs pertinents favorisant la connaissance socioéconomique des usages de l'eau, la non-maîtrise de la quantité d'eau entrant dans le bassin, la dégradation de la qualité des ressources en eau, les risques sanitaires, l'eutrophisation du lac et la sédimentation. La valorisation des eaux sous toutes ces formes et la mise en œuvre des moyens de lutte

nécessitent un engagement participatif. A cet effet d'Aubriot (2006) dans ces travaux sur les eaux de surface en Inde du Sud souligne la nécessité pour l'Etat, fournisseur d'eau, d'assurer aussi son rôle de protecteur de cette ressource précieuse afin d'en assurer l'accès équitable à toutes les couches de la population. Pour l'essentiel, les différents ouvrages ont abordé de façon globale la question de la gestion des ressources en eau, ce qui a permis de cerner certains points clés et de mieux circonscrire le sujet. Eu égard à tout ce qui précède, des solutions ont été alors proposées aux autorités. Lesquelles solutions nécessitent, l'utilisation d'outils composés des modèles de capacité de support des lacs, des eaux de surface, des retenues...etc., afin de s'assurer que les développements planifiés et mis en œuvre, tiennent compte de l'impact des changements climatiques.

3. But de la recherche

Cette recherche vise à contribuer à un meilleur approvisionnement en eau de la population.

4. Problème et questions de recherche

Cette étude tente de répondre aux questions ci-dessous :

- Quel est l'impact de la variabilité climatique sur la ressource en eau du barrage ?
- Quelle est la disponibilité de la ressource en eau au niveau du barrage ?
- Quels sont les besoins (actuels et futur) en eau de la population ?
- La ressource est-elle suffisante pour répondre à ces besoins actuels et futurs ?

5. Objectifs du mémoire

5.1 Objectif général

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la disponibilité en eau du barrage de Djougou pour les besoins des populations.

5.2. Objectifs spécifiques

De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser la variabilité hydro-climatique du barrage de Djougou et analyser son impact sur la disponibilité de la ressource en eau de celui-ci,
- évaluer la ressource en eau du barrage à travers le bilan hydrologique
- simuler la distribution et la demande en eau de la population

6. Hypothèses de travail

Les hypothèses suivantes ont été énoncées à cet effet :

- la variabilité climatique entraîne une baisse des précipitations et un déficit d'écoulement
- la disponibilité en eau du barrage est insuffisante

- la demande en eau pour les besoins de la population est très élevée

7. Résultats attendus de l'étude et cibles

A la fin de cette étude l'impact de la variabilité climatique sur la ressource en eau du barrage de Djougou sera connu ainsi la quantité disponible. Elle permettra d'avoir une meilleure connaissance des besoins en eau de la population.

8. Grande divisions du mémoire

Pour pouvoir atteindre ces objectifs, cette étude a été structurée en deux (02) chapitres.

Le premier chapitre intitulé « données, matériels et méthodes » s'intéresse à la présentation du milieu d'étude, la description des données utilisées, les matériels (logiciels) utilisés et abordera la méthodologie adoptée. Le chapitre 2 présente les résultats et discussion.

CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

1.1 Introduction

Le chapitre 1 de notre travail présente le milieu d'étude, les données et matériel utilisés, et décrit la méthodologie. La bonne connaissance du milieu d'étude facilite la compréhension de l'étude car cette connaissance permet de bien interpréter les résultats de l'étude et d'établir les relations de cause à effet.

1.2. Milieu d'étude

Nous présentons dans cette rubrique la description de la zone d'étude.

1.2.1. Localisation

Djougou est une commune urbaine située entre les latitudes 9°42' et 9°7' Nord et les longitudes 1°40' et 1°66' Est à environ 450 km de Cotonou, la capitale économique du Bénin. Elle fait partie des quatre communes qui composent le département de la Donga au Nord-Ouest du Bénin. Elle est limitée au nord par les communes de Kouandé et de Péhunco, au sud par la commune de Bassila, à l'est par les communes de Sinendé, de N'dali et de Tchaourou et à l'ouest par les communes de Ouaké et de Copargo. Chef-lieu du département, et couvre une superficie de 3966 km².

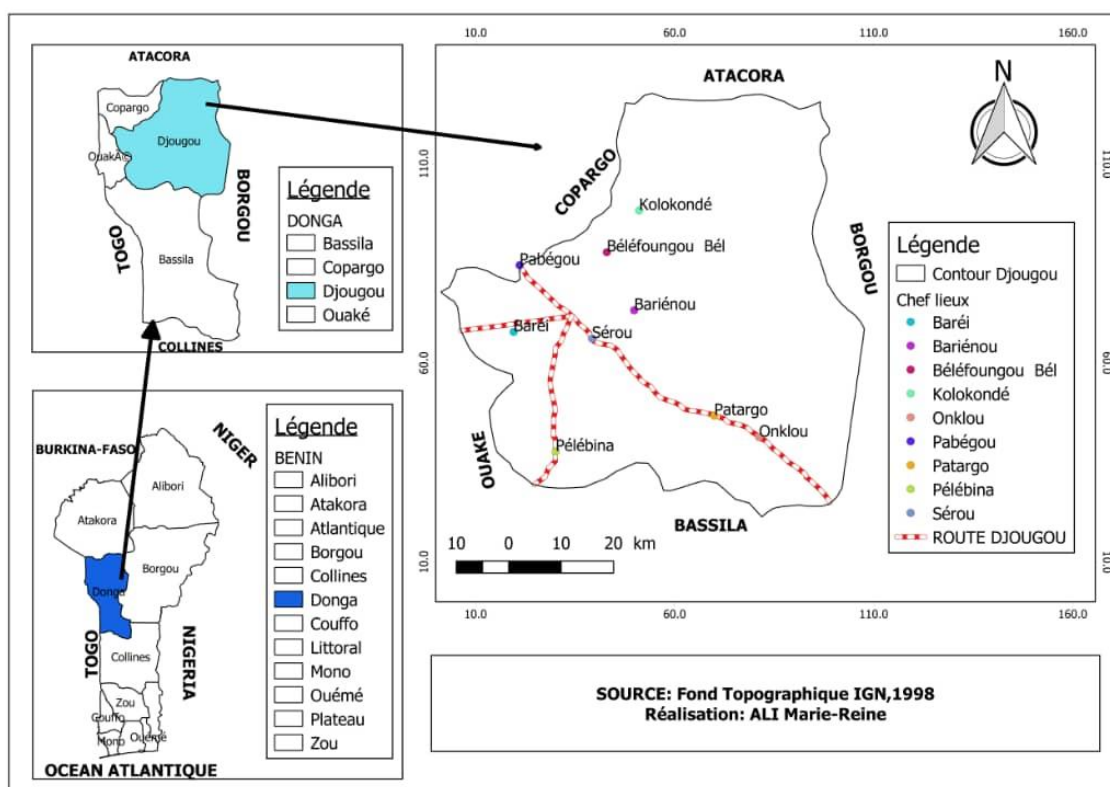


Figure 1: Localisation de la ville de Djougou

1.2.2. Géomorphologie et géologie

La Commune de Djougou présente un relief accidenté et le plateau est parsemé de collines de faibles dénivellations. Elle est géologiquement caractérisée par des roches de l'âge du Dahomeyen dominées par une série de gneiss de la Mékrou et de Djougou ; il s'agit de : gneiss à biotite, à deux micas, amphibole dans la zone Nord.

1.2.3. Hydrologie

La ville Djougou bénéficie d'un réseau assez important de cours d'eau plus ou moins important compte tenu de sa situation géographique. Il s'agit des affluents de l'Ouémé (510km de long avec un débit moyen mensuel de 0 à 700m³/s). Ce cours d'eau a un régime irrégulier et est modeste de par son débit et sa longueur (Boko, 2013). La densité de ce réseau hydrographique offre des unités spatiales hydrologique de taille très variables et de débits saisonniers. Le bassin qui la traverse est l'Ouémé supérieur dont les affluents sont Donga et Affon.

1.2.4. Sols, végétation, climat et hydrographie

- **Sols**

Les sols sont de texture argilo-sableuse ou latéritique (gravillonnaires ou caillouteux) globalement favorables à l'agriculture. On y distingue deux types de sols : les sols ferrugineux peu lessivés et les sols ferralitiques qui sont présents dans les zones à couches d'altérites épaisses.

- **Végétation**

La végétation est constituée de savanes arborées et arbustives plus ou moins dégradées par les pratiques culturales. Ces savanes sont composées de formations mixtes d'arbustes et d'arbres. Le couvert végétal est relativement abondant et donne une allure de savane boisée.

- **Climat**

La commune de Djougou est caractérisée par un climat de type Nord-Guinée avec deux saisons bien marquées que sont la saison sèche dont la durée est de cinq mois (novembre à mars et la saison pluvieuse qui dure six mois (avril à septembre). Les précipitations varient entre 1000 mm et 1500 mm d'eau pour 75 à 140 jours effectifs de pluie (Biaou, 2006). Elle connaît de décembre à février, l'harmattan, un vent sec et frais qui souffle du sahara vers l'ouest.

▪ Hydrographie

Située dans le bassin versant de Wewe-Ouémé, la ville de Djougou est drainée par quatre (4) cours d'eau d'une longueur totale de 21 km : Donga ; Affon (affluent de l'Ouémé supérieur) ; Monmon-gou et Doninga et dispose par ailleurs de cinq (05) retenues d'eau dont le barrage de Djougou situé au sud à l'entrée de la ville à Soubroukou, dans le premier arrondissement. Il est alimenté par le bassin-versant de Wêwê-Ouémé qui couvre une superficie de 29,87 km² pour un périmètre de 26,87 km, sur une altitude moyenne de 420 m (Figure 2).

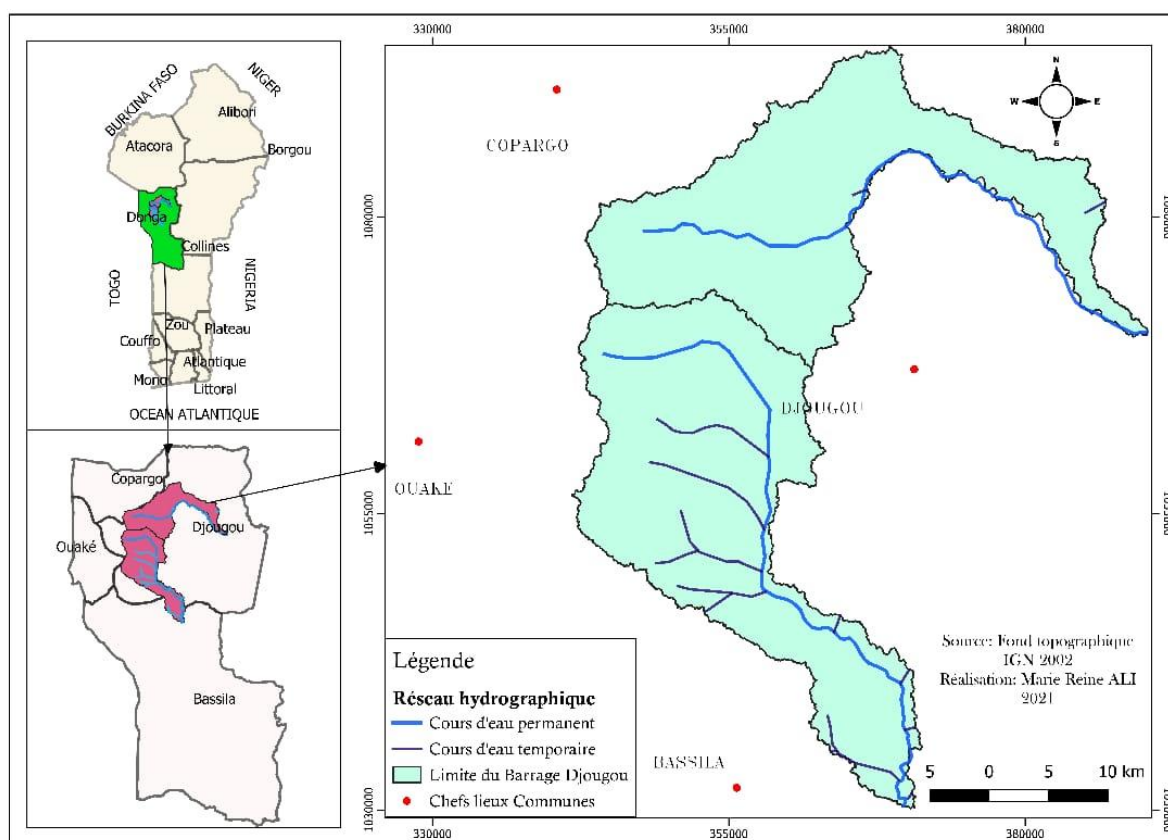


Figure 2: Plan d'eau du barrage de Djougou

1.2.5. Quelques aspects socio-économiques

Les activités agricoles sont exercées par environ 70 % de la population active. Les principales cultures vivrières sont l'igname, le sorgho, le maïs, le mil, le niébé et le manioc. Les principales cultures de rentes sont le coton et l'arachide. Le ramassage et la cueillette du néré, de l'anacarde et du karité sont également des sources de revenus.

L'élevage reste encore traditionnel et non intégré à la production animale. Les bovins sont en général confiés aux éleveurs peulhs. Les autres animaux élevés sont les ovins, les caprins et les

porcins. Un important marché de bétail est situé à Kolokondé, un arrondissement de la commune de Djougou.

Le commerce et l'artisanat représentent ensemble la deuxième source de revenus après les activités des vivres et les produits manufacturés. L'artisanat est une activité menée par les potiers, les vanniers, les tisserands, les soudeurs et les menuisiers.

1.3 Données utilisées

Pour atteindre les objectifs cités plus haut nous avons adopté une méthodologie axée sur la recherche documentaire, la collecte des données et une visite de terrain. Les précipitations et les écoulements constituent des indicateurs de choix pour les études de la variabilité climatique (Sig-homnou, 2004).

1.3.1 Données hydroclimatiques

Les données climatiques telles que les précipitations, la température et l'évapotranspiration (ETP) à l'échelle journalière ont été collectées de la base de données de Météo-Bénin sur une période de 30ans allant de 1986-2016 car on observe moins de données manquante sur cette dernière. Etant donné que Djougou ne possède pas une station synoptique nous avons considéré les données d'évapotranspiration de la station la plus proche c'est-à-dire celle de Parakou. Par ailleurs, les données de débits moyens journaliers de la station hydrométrique de wêwê sont obtenues à la Direction Générale de l'Eau (DG/EAU) sur cette même période.

1.3.2 Débits de pompage

Les données relatives à l'eau brute, pompée du barrage vers la station de traitement. Elles sont au pas de temps mensuel et couvrent la période de 2016 à 2021. Ces données sont recueillies à la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB) de Djougou.

1.3.3 Les données relatives aux caractéristiques du barrage de Djougou

Les caractéristiques d'une retenue permettent de connaître ses paramètres physiques. Le barrage de Djougou encore appelé lac Téro a été créé en 1959 et est alimenté par le bassin versant de wêwê-Ouémé. Il couvre une superficie de 29,87 km² pour un périmètre de 26,87 km, sur une altitude moyenne de 420 m. Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau1 ci-après.

Tableau 1: Caractéristiques du bassin versant wêwê-Ouémé

Caractéristiques du bassin versant

Superficie	km ²	29.87
Périmètre	km	26.18
Longueur du cours d'eau	km	9.40
Cote maximale	m	484
Cote minimale	m	415
Pente	m/km	6.14
Indice de Gravelius	Kc	1.35
Capacité de stockage	m ³	251437
Réserve morte	m ³	58670

Les études antérieures réalisées sur ce barrage par Honvoh (2015), nous ont permis d'avoir d'autres Informations telles que : la capacité de stockage (251.437 m³) ; la côte existante de 420,68 m (PEN) évaluer sur la base des levés bathymétriques (le tableau regroupant ses données se trouve en annexe (1)) ainsi que la courbe représentant la relation hauteur-volume reconstituée à partir desdites données sur la période de 2014-2015. Voir figure 3 ci-après.

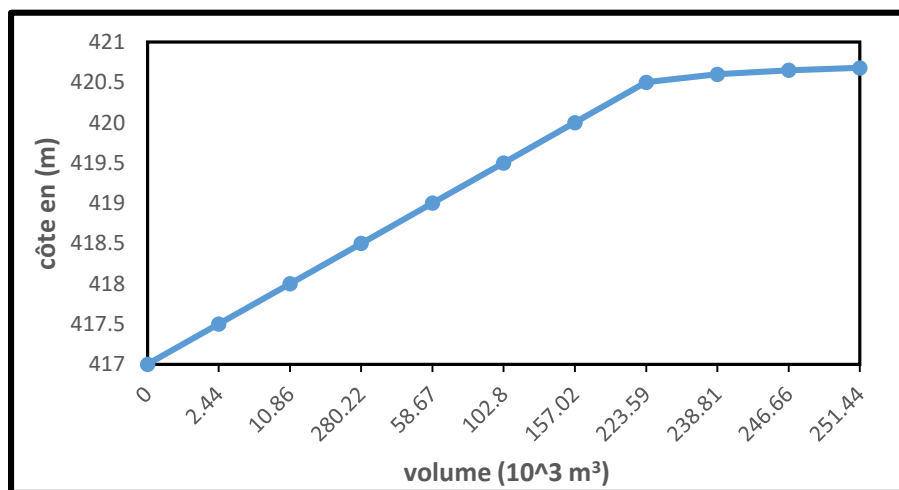


Figure 3: Courbe Hauteur-Volume initiale du lac Téro

1.3.4 Approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau potable dans la ville de Djougou est assuré par la SONEB. En dehors des puits traditionnels l'eau d'alimentation provient essentiellement des forages et du barrage de Djougou. Les données concernant le volume d'eau distribué à la population obtenues auprès du

chef de production de l'agence (SONEB) de Djougou de 2016 à 2021 sont regroupées dans le tableau 2 ci-après :

Tableau 2: volume d'eau distribué à la population

années	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Consommation en eau (m ³)	112.197	44.149	40.021	108.400	128.547	155.067

1.3.5 Arrosage pour la pépinière

Pour une plante, le dosage d'eau est fonction de la qualité du sol mais ses besoins en eau dépendent de trois facteurs principaux : le climat, l'espèce végétale et le moment du cycle végétatif. Selon les informations obtenues lors de notre visite sur le terrain, le nombre total de plan arrosés à partir de l'eau du barrage de Djougou est estimé à 5000 plans par an soit 60% pour l'anacardier et 40% pour le manguier et le corossolier. Les besoins en eau annuel de tous les plans ont été calculés par le produit du nombre de tête de chaque type de plan avec son besoin en eau théorique en considérant une consommation de 1l/jr pour les anacardier et 1.5l/jr pour le manguier et le corossolier. Le tableau 3 suivant donne les besoins en eau par type de plants. Ses données seront utilisées pour le calcul du bilan hydrologique.

Tableau 3 : besoin en eau théorique par type de plants

Type de plan	anacardier	corossolier	Manguier
Besoin en eau théoriques m3/j/plan	0.001	0.0015	0.0015

1.3.6 Les données démographiques

Les données démographiques renseignent sur la taille de la population de Djougou ainsi que le taux d'accroissement. Elles proviennent de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE, 2013). Le recensement de 1972 estimait la population de Djougou à 87 178 habitants ; en 1992 elle est passée à 134 099 habitants avec un taux de croissance annuel de 3,12 %. En 2002, elle a été estimée à 181 895 habitants avec un taux de croissance de 3,10% (INSAE, 2002). La population de la ville de Djougou est de 267812 habitants selon le dernier recensement

de 2013 et est constituée en majorité du groupe socioculturel Yom-Lokpa qui en constitue 51% et la religion la plus pratiquée est l'islam (72%) (INSAE, 2013).

1.4 Matériels

Le principal outil de travail qui nous a permis de mener à bien cette recherche scientifique est un ordinateur portable muni des logiciels :

- Word 2016 pour le traitement de texte ;
- Excel 2016 (marque déposée de Microsoft Corporation) qui est un tableur intégrant graphique, tableau et base de données. Cet outil nous a permis d'appliquer les calculs statistiques et tracer les diverses courbes obtenues ;
- QGIS 3.10.2 pour la réalisation des cartes ;
- Khronostat 1.01 pour appliquer les méthodes de détection de ruptures dans les séries ;
- WEAP est utilisé pour la planification de l'exploitation des ressources en eau.

- **Description du logiciel WEAP**

Au cours de la dernière décennie une approche intégrée du développement de l'eau a émergé plaçant les projets d'approvisionnement en eau dans le contexte de gestion de la demande, de la qualité de l'eau, de la préservation et de la protection des écosystèmes. WEAP intègre ces valeurs dans un outil pratique pour la planification des ressources en eau et l'analyse des politiques. Il place les problèmes liés à la demande tels, les modèles d'utilisation de l'eau, les stratégies de réutilisation, les coûts et plans d'allocation de l'eau sur un pied d'égalité avec les sujets liés à l'offre tels que les débits des cours d'eau, les ressources en eau souterraines, les réservoirs et les transferts d'eaux. WEAP est utilisé pour examiner les alternatives de développement de l'eau et des stratégies de gestion. Il tente d'assister les planificateurs habiles. Plusieurs auteurs l'ont déjà utilisé pour l'évaluation de la ressource en eau en Afrique Subsaharienne. C'est le cas de Razanamahandry (2013) qui a utilisé WEAP sur la retenue de KIERMA dans le cadre de l'élaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles. De même, Chabi (2019) dans sa thèse sur la gestion intégrée des ressources en eau de l'Ouémé à l'exutoire du pont de Savè dans un contexte des changements climatiques a utilisé WEAP pour la

mise en valeur du réservoir de ILAUKO. Selon Yates et al. (2005) cité par Chabi, (2019), la structure des données peut être facilement personnalisée pour atteindre les exigences d'une analyse particulière et pour refléter les contraintes imposées par des données restreintes. En général, les applications de WEAP incluent plusieurs étapes :

- La définition de l'étude qui identifie la période de simulation, les limites spatiales, des composantes du système et la configuration du problème.
- L'état actuel, qui peut être considéré comme une étape de calage dans l'élaboration d'une application, fournit une vue instantanée de la demande en eau actuelle, du système en étude. En effet, les hypothèses de base doivent être construites dans cet état actuel pour représenter les facteurs qui affectent la demande, la pollution, la fourniture et l'hydrologie.
- Les scénarios sont construits sur la base de l'état actuel. Ils permettent d'explorer les impacts d'hypothèses alternatives ou des politiques sur la disponibilité et l'usage de l'eau dans le futur. Finalement, les Scénarios sont évalués par rapport à la disponibilité des ressources en eau pour le système considéré par exemple.

WEAP a deux fonctions principales (Sieber et al., 2004) :

- Simulation des processus hydrologiques naturels (évapotranspiration, ruissellement et infiltration, etc.) pour permettre l'évaluation de la disponibilité de l'eau dans un bassin versant.
- Simulation d'activités anthropiques pour évaluer leur impact dans l'utilisation de l'eau.

1.5 Méthodes

1.5.1. Contrôle de la qualité des données

Comme pour tout type d'analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Divers moyens permettent d'estimer, à un moment donné, la valeur probable d'un paramètre qui n'a pas été observé. Pour cette étude, la méthode choisie pour l'interpolation spatiale de la pluviométrie sur le bassin est la méthode de l'inverse des distances au carré. Alors, les données hydrométriques ont été minutieusement traitées (élimination des années ayant assez de données manquantes) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes.

1.5.2. Méthodes de traitement des données

1.5.2.1 Caractérisation de la variabilité hydro-climatique

La mise en évidence de la variabilité climatique et hydrologique par le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 et l'indice de NICHOLSON permet à travers l'exploitation de données pluviométriques et hydrométriques obtenues pour une longue série de mesures, allant de 1986 à 2016, de mettre en évidence les tendances climatiques et hydroclimatiques et de différencier les périodes sèches des périodes humides (Soro et al., 2011).

✓ L'indice de S.E. NICHOLSON

L'indice de Nicholson calculé pour chaque année est exprimé par l'équation suivante (Nicholson et al., 1988) :

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

I_i : Indice de Nicholson

X_i : Hauteur de pluie en mm (ou débit en m³/s) pour une année i

$\bar{X}$: Moyenne annuelle de pluie en mm (ou débit en m³/s) sur la période d'étude

σ : Écart-type de la pluviométrie (ou débit) sur la période d'étude

L'indice de Nicholson est une méthode qui permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométrique et hydrologique de la région. C'est-à-dire de différencier les périodes sèches des périodes humides comme il est indiqué dans le tableau 4.

Tableau 4:Signification de l'indice de Nicholson

$I_p > 2$	Humidité extrême	$-0,99 < I_p < 0$	Sécheresse légère
$1,5 < I_p < 1,99$	Humidité sévère	$-1,49 < I_p < -1$	Sécheresse modérée
$1 < I_p < 1,49$	Humidité modérée	$-1,99 < I_p < -1,5$	Sécheresse sévère
$0 < I_p < 0,99$	Humidité légère	$I_p < -2$	Sécheresse extrême

✓ Filtre passe bas de HANNING d'ordre 2

Le Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 encore appelée méthodes des moyennes mobiles pondérées permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique et de mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques. Le calcul des totaux pluviométriques annuels est effectué par une méthode de pondération au moyen des équations recommandées par Tyson et al. (1975), présenté par Assani (1999). Il englobe à la fois différentes formules en fonction

de la position de l'année pour laquelle on veut calculer la moyenne mobile pondérée dans la série. Pour ce fait, les totaux pluviométriques et les débits sont pondérés suivant l'équation (2) :

$$X_{(t)} = 0.06x_{(t-2)} + 0.25x_{(t-1)} + 0.38x_{(t)} + 0.25x_{(t+1)} + 0.06x_{(t+2)} \quad (2)$$

Avec $3 \leq t \leq n - 2$ où, $X_{(t)}$ est le total de cumul pluviométrique pondéré du terme t ; n la taille de la série, $x_{(t-2)}$ et $x_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques des deux termes qui précèdent immédiatement le terme t , $x_{(t+1)}$ et $x_{(t+2)}$ sont les totaux pluviométriques des deux termes qui suivent immédiatement le terme t .

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes [$X_{(1)}$, $X_{(2)}$] et des deux derniers termes [$X_{(n-1)}$, $X_{(n)}$] sont obtenus respectivement avec les équations, (3,4,5,6) suivante :

$$X_1 = 0.54x_1 + 0.46x_2 \quad (3)$$

$$X_2 = 0.25x_1 + 0.50x_2 + 0.25x_3 \quad (4)$$

$$X_{(n-1)} = 0.25 x_{(n-2)} + 0.50 x_{(n-1)} + 0.25 x_{(n)} \quad (5)$$

$$X_{(n)} = 0.54 x_{(n)} + 0.46 x_{(n-1)} \quad (6)$$

Le logiciel Khronostat de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD), a permis de faire une analyse statistique afin de détecter les ruptures dans la série pluviométrique. Ce dernier comporte plusieurs tests de détection de rupture parmi lesquels nous avons utilisé :

✓ **La méthode de segmentation d'Hubert**

La méthode de segmentation d'Hubert consiste à découper la série en « m » segments de telle sorte que la moyenne calculée pour un segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s) (Hubert et al., 1989). La segmentation qui sera retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre « m » de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum et que les moyennes de deux segments contigus soient significativement différentes.

✓ **La méthode bayésienne d'A.F.S. Lee et S.M. Heghinian (1977)**

Elle vise à confirmer ou à infirmer l'hypothèse d'un changement de moyenne dans la série. Il s'agit d'une approche paramétrique dont l'application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de celle-ci. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. La procédure repose sur le modèle suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_{ii} = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_{ii} = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

Les variables τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. τ et δ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. Le changement éventuel (la position et l'amplitude) correspond au mode des distributions a posteriori de τ et δ . La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produise au moment τ dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. Pour les variables hydroclimatiques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture en appliquant, selon S. Ardoinbardin (2004), la formule suivante :

$$D = \frac{\bar{X}_j}{\bar{X}_i} - 1 \quad (8)$$

Où $\bar{X}_j$ représente la moyenne sur la période après la rupture et $\bar{X}_i$ la moyenne sur la période avant la rupture.

1.5.2.2. Evaluation de la ressource en eau du barrage

✓ Bilan hydrologique

De nos jours, dans la perspective d'une bonne planification et de gestion durable des ressources en eau ; l'établissement d'un bilan hydrologique fiable des systèmes hydrologiques devient donc un enjeu scientifique majeur (Celeste & Billib, 2010 ; Martínez-Granados et al., 2011 ; Garg et al., 2012). Plusieurs travaux ont été effectués dans le domaine du bilan hydrologique sur un bassin versant, soit sur une retenue. A cet effet, plusieurs d'auteurs, Vuillaume (1981), Dubreuil (1966) ; Aellen (1990) ; Abdellaoui (2002) ; Fowe (2015) etc. ont évalué le bilan hydrologique basé sur l'application de l'équation du bilan qui découle du principe de conservation des volumes d'eau.

Dans cette étude, le bilan d'eau sur le barrage de Djougou est aussi fait sur la base du principe de conservation des volumes d'eau à l'instar des travaux antérieures, Sur un intervalle de temps donné, l'équation générale du bilan hydrologique d'une retenue est la suivante :

$$\Delta V = V_p + V_{rs} + V_{ecs} - V_e - V_i - V_d - V_u \quad (9)$$

Avec :

ΔV : Variation du stock d'eau dans le réservoir.

V_p ; V_{rs} ; V_{ecs} : Volumes entrants représentant respectivement les apports dus aux

Précipitations tombant directement dans le réservoir, les apports par ruissellement, les apports souterrains en (m³) ;

V_e ; V_i ; V_d et V_u : Volumes sortants du réservoir représentant respectivement le volume d'eau évaporée, les pertes par infiltration, le volume d'eau sortant du réservoir par déversement et le volume d'eau prélevée pour divers usages (m³) ;

Afin de réduire le nombre d'inconnues, la variation de stock (ΔV), les volumes débordés sont supposés négligeable, de même que les volumes des apports d'eau souterraine (V_{ecs})

✓ **Evaluation des apports par précipitations dans le réservoir**

L'apport des volumes précipités directement sur le plan d'eau est égal à la lame d'eau précipitée dans l'année multipliée par la surface moyenne du réservoir. Ainsi, on a :

$$V_p = \frac{S \times L_p}{1An} \quad (10)$$

Avec, V_p le volume d'eau précipité ; S la surface du plan d'eau et L_p , la lame d'eau précipitée dans l'année.

✓ **Estimation des apports par ruissellement**

Les enquêtes effectuées sur le terrain en collaboration avec le personnel de la SONNEB de Djougou ont permis de savoir que le barrage est alimenté par le bassin de wêwê. Pour avoir les débits à l'entrée du barrage, nous avons déterminé la superficie du bassin versant de wêwê ce qui nous a conduit à établir une égalité entre les débits spécifiques moyens annuels sur le barrage et le bassin de wêwê. La relation ci-dessous a permis d'estimer les débits moyens annuels au niveau du barrage sur la période de 1986 à 2016 :

$$\frac{R_w}{S_w} = \frac{R_b}{S_b} \quad V_{rb} = \frac{R_w \times S_b}{S_w} \quad (11)$$

avec R_b et R_w représentant respectivement le ruissellement au niveau du barrage et du bassin de wêwê ; S_b et S_w représentant les superficies et V_{rb} le volume d'eau ruisselé au niveau du barrage. La relation $v = q.t$ entre le débit (q) et le volume (v) a permis de trouver le volume moyen annuel d'eau écoulé sur la période de 1986 à 2016.

✓ **Estimation de l'Evaporation (E)**

Deux types de mesures permettent d'évaluer les paramètres de l'évaporation. Ce sont :

- Les mesures directes de l'évaporation : elles se font de deux manières différentes, au « Piche » et sur « Bac »,
- les mesures indirectes à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) que nous allons utiliser : on peut schématiquement écrire l'évaporation d'une surface par l'équation suivante :

$$E = \alpha . ETP \quad (12)$$

La première étape consiste à obtenir les valeurs de l'ETP. Il est déterminé grâce à la méthode de Thornthwaite utilisée par (Soro, 1987 ; Biémi, 1992 et Saley, 2003) suivant l'équation (13) :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right) \alpha \times F(\lambda); \quad I = \sum_{i=1}^{12} i i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (13)$$

$$\alpha = 0.016I + 0.5$$

Où t , est la température moyenne de la période considérée, α la fonction complexe de l'indice I , I l'indice thermique annuel et $F(\lambda)$ le facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu et est donné par les tables de P. Brochet et N. Gerbier (1968).

Il convient ensuite de calculer l'évaporation (E). Le coefficient α qui traduit la disponibilité en eau dans les premiers horizons du sol est toujours inférieur ou égal à 1. Il faut, pour l'exprimer de façon rigoureuse, connaître à la fois le stock d'eau présent dans le sol et les résistances opposées par le système sol/végétation à l'évaporation. Nous avons donc adopté la même hypothèse que Sutcliffe et Piper, (1986), à savoir :

- Si $P_i > ETP_i$ $\alpha = 1$ où P_i = pluie mensuelle en mm
- Si $P_i < ETP_i$; $\alpha = \frac{P_i}{ETP_i}$ ETP_i = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm.

✓ Estimation des pertes par infiltration

Les apports souterrains ne sont pas pris en compte pour cette étude, en raison de la nature du sol (zone de socle) du milieu d'étude. De ce fait, le volume infiltré est estimé en période d'étiage, période sans apports dans le barrage et avec des prélèvements faibles voire négligeables (Sukhija et al., 1997 ; Mugabe et al., 2003 ; Kingumbi et al., 2004 ; Lacombe, 2007). Ainsi, l'équation (9) est réduite à l'équation :

$$V_I = V_s^t - V_s^{t+1} - V_e^t \quad (14)$$

Avec V_I le volume infiltré m^3 ; V_s^t le volume entrant à l'instant t et V_s^{t+1} le volume sortant à l'instant $t+1$ et V_e^t le volume évaporé l'instant t .

1.5.2.3 Modélisation de l'allocation de la ressource en eau

○ Demande en eau

L'eau du barrage est principalement utilisée pour l'approvisionnement en eau potable. Mais elle est également utilisée en de petite quantité pour l'arrosage des plans d'arbre (pépinières de plans d'arbre).

○ Estimation des besoins

L'eau du barrage étant utilisée principalement pour l'approvisionnement en eau potable il est donc nécessaire de faire une estimation de ces besoins. Cette estimation est donnée par la formule :

$$B_e = P_n \times \text{norme de consommation} \times j$$

Avec P_n : la population actualisée donnée par la formule

$$P_n = P_0 \times (1+\alpha)^n$$

P_0 : Population à l'année de référence

n : Nombre d'années

α : Accroissement de la population

J : le nombre de jour

○ Etape de traitement dans WEAP

WEAP opère avec les principes de base du bilan d'eau. Les applications de WEAP incluent plusieurs étapes à savoir :

- la spécification de la zone d'étude : il s'agit soit d'identifier la zone d'étude dans WEAP soit importer de couche d'image de cette zone.
- la mise en place des objets : ce sont des objets déjà définis dans WEAP. Ils regroupent les sites de demande, le site de captation ou la source, et les liaisons de transmission entre ces deux sites.
- le réglage des paramètres généraux. Ces paramètres sont constitués par : la période de la simulation (Intervalle de temps de simulation définis par l'utilisateur), le pas de temps, les hypothèses clés, et les scénarios. Les hypothèses clés sont des variables qui permettent de différencier les scénarii proprement dits (climat variable selon la situation réelle) des scénarii de référence (situation imaginaire sans aucune variation interannuelle). Ces variables influent sur l'état de la demande ou bien celui de la source. Les scénarios sont des variables construites à partir des hypothèses clés sur la base de l'état actuel. Ils se présentent sous trois formes. Dans WEAP, deux formes des scénarios existent déjà par défaut. Il s'agit de la situation actuelle ou « compte courant » et de la situation future nommée « scénario de référence ». Le compte actuel révèle l'état actuel de chaque

site considéré. Le « Scénario de référence » projette les données de l'état actuel sur toute la période de simulation c'est-à-dire les scénarii créés dans une période de référence choisie correspondent au climat constant (SEI, 2008). Le troisième format de scénario reflète les changements possibles du système pour les années futures, après l'année de l'état actuel. Ces changements pourraient être en rapport avec le mode de prélèvement suite à l'évolution de la technologie ou bien avec l'accroissement de la demande suite à l'augmentation de la population, etc. Les résultats de ce troisième format de scénario doivent toujours être comparés avec ceux du scénario de référence pour bien montrer le changement qui a eu lieu. Ce changement peut être aussi des phénomènes naturels, par exemple la variation de la température qui influe sur l'évaporation de l'eau de la retenue, l'irrégularité des précipitations pour les années à venir. Ainsi, la projection de ces paramètres est effectuée à l'aide de scénarios synthétiques. Ce scénario nécessite de définir un taux de variation annuelle pour chaque paramètre. Nous ne pouvons pas déterminer à l'avance le régime climatique pour l'année à venir avec cette méthode de scénario synthétique. Nous pouvons seulement agir sur la variation annuelle de chaque paramètre climatique qui influe sur le volume d'eau stocké dans le réservoir pour les prochaines années, c'est-à-dire l'évaporation et la précipitation. - L'étape finale consiste à introduire les données correspondantes à chaque objet créé dans la vue schématique et à chaque hypothèse en utilisant la vue « donnée » et d'afficher ensuite les résultats à l'aide de la vue « résultats ».

○ **Modélisation de l'allocation par WEAP**

Sur l'interface de WEAP nous avons ajouté la zone d'étude, le barrage et les différents cours d'eau qui traversent la zone d'étude. Nous avons créé un site de demande car nous n'avons qu'un seul type de prélèvements important au niveau de la retenue : l'approvisionnement en eau potable. Cet élément est représenté par un point rouge. Quant au barrage elle est matérialisée par un triangle de couleur verte. Le site de demande est relié au barrage par une flèche verte. Par ailleurs, la répartition des ressources se fait sur la base des priorités accordées aux différents usages. WEAP optimise l'allocation de l'eau, en fonction d'une définition des priorités. Ainsi, chaque site de demande est affecté d'un niveau de priorités. Lesquelles priorités sont exprimées en nombres entiers compris entre 1 (priorité la plus élevée) et 99 (Priorité la plus faible). De tout ce qui précède, dans le cadre de cette étude, nous n'avons qu'un seul site de demande dont la priorité de satisfaction en eau est égale à 1 (figure 4).

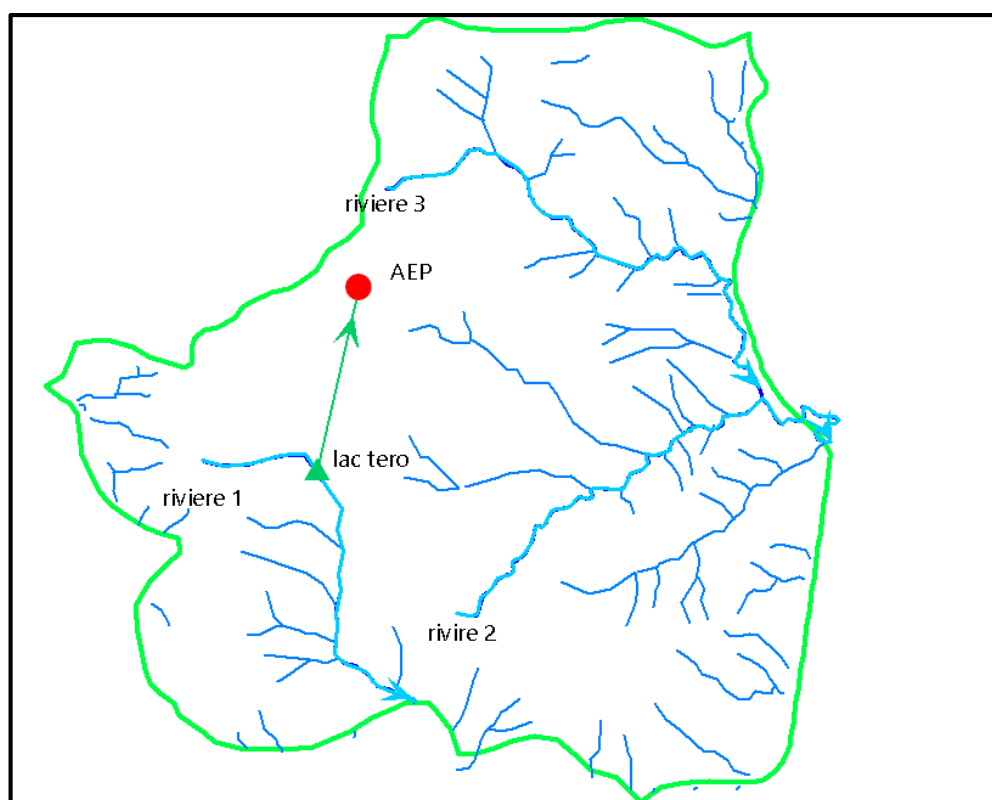


Figure 4: Schéma conceptuel de modélisation par WEAP de la station de Djougou

- **Hypothèses clés**

Les hypothèses clés suivantes ont été énumérées :

- Utilisation eau domestique : $4.82\text{m}^3/\text{hbt}/\text{an}$
- Taux d'accroissement de la population : 3.5%

- **Création des scénarios**

Le modèle WEAP est utilisé pour modéliser les besoins réels en eau et prévoir les tendances futures grâce à la construction des scénarios. Il permet aux utilisateurs de construire et d'intégrer les scénarios dans une approche de modélisation. L'approche utilisée dans cette étude est de montrer l'évolution des demandes en eau pour l'AEP.

Dans cette étude, l'année de « compte courant » choisie pour servir d'année de base au modèle (état actuel) est 2015. Elle contient toutes les informations pertinentes du système et forme l'ensemble de données à partir desquelles des scénarios sont construits. La période de temps pour laquelle les scénarios sont projetés est 2016-2050.

- **Création de scénario de référence**

Le scénario de référence est un scénario hérité du compte courant. Il faut changer sa description pour refléter son rôle réel. Il traduit simplement la projection des tendances courantes des différentes demandes à horizon 2016-2050. Il sert de point de comparaison pour les autres scénarios dans lesquels des changements des données du système peuvent être opérés. En dehors du scénario de références deux autres scénarios basés sur le fort taux de croissance de la population (3.5% et 5%) ont été créés.

- **Calage du modèle WEAP**

Le calibrage d'un modèle consiste à ajuster les valeurs des paramètres, afin que les valeurs calculées d'une variable soient aussi proches que possible des valeurs observées de cette variable. Dans cette étude, la variable est le volume du barrage de Djougou. La période de calage est 2015 et la validation est faite en 2016. Les raisons qui motivent ce choix, sont le nombre des données très limité sur le site.

1.6 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous retenons que, pour une bonne modélisation du barrage de Djougou, plusieurs données (climatiques, hydrologiques, démographique et celles relatives aux caractéristiques du barrage) et méthodes ont été utilisées. En effet les méthodes statistiques et le calcul des indices ont permis de caractériser la variabilité climatique sur la zone d'étude ; la méthode du bilan hydrologique est présentée. Elle est basée sur l'équation générale du principe de conservation des volumes d'eau sur un intervalle de temps. Enfin le logiciel WEAP a été décrit et utilisé pour l'allocation et la gestion des besoins en eau. Les résultats obtenus seront présentés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2 : RESULTAS ET DISCUSSION

2.1. Introduction

Depuis le début des années 70, on observe de grandes modifications du régime des précipitations en Afrique de l'Ouest. Plusieurs études ont montré une modification du régime pluviométrique dès 1966 ; essentiellement au Sénégal et en Guinée Bissau, puis en Guinée Conakry, au Mali, au Burkina Faso et au nord du Bénin (Alamou et al. 2016). Cette partie aborde dans sa globalité une étude quantitative des ressources en eau du barrage de Djougou. A cet effet, nous présentons d'une part, l'évolution des variables hydroclimatiques (Pluie, ETP, température et débits) à l'échelle du bassin de l'Ouémé à wêwê. D'autre part, nous évaluons les impacts de la variabilité climatique sur la disponibilité de l'eau du barrage.

2.2 Variabilité hydroclimatiques

2.2.1 Variabilité interannuelle des précipitations

La série annuelle des précipitations au niveau de la station de Djougou montrent une diminution progressive de pluie de 1986 à 1987 puis une légère reprise des précipitations de 1988 à 2016. La moyenne interannuelle des précipitations sur les 30 années d'observations est de 1278.14 mm ; avec comme valeurs extrêmes minimale 950.9 mm en 2006 et maximale 1839.1 mm en 2003 (tableau 5). L'application de la procédure de segmentation de Hubert de la série pluviométrique n'a présenté aucune rupture. Par contre la méthode bayésienne d'A.F.S. LEE et S.M. Heghinian montre une rupture nette pour l'année 1987 avec une probabilité de 0,11.

Tableau 5: pluviométrie interannuelle à la station de Djougou (1986-2016)

Années	Hauteur de pluie(mm)	Années	Hauteur de pluie(mm)
1986	1136.9	2003	1839.1
1987	976.5	2004	1299
1988	1444.5	2005	1341.7
1989	1293.6	2006	950.9
1990	1083.11	2007	981.2862409

1991	1483.7	2008	1262.8
1992	1129.9	2009	1570
1993	1327.5	2010	1522.9
1994	1305.4	2011	954.6
1995	1773.2	2012	1480.7
1996	1202.95377	2013	1021.3
1997	1238.9	2014	1032.1
1998	1343.3	2015	1322.41173 3
1999	1364.9	2016	1319.3
2000	1285.6	-	-
2001	1170.6	-	-
2002	1163.8	-	-

2.2.2 Evolution des indices de précipitations

Les indices pluviométriques calculés à l'aide des séries pluviométriques au niveau de la station de Djougou montrent de forte variabilité avec le calcul classique de Nicholson (figure 5).

La méthode de Filtre Passe-Bas de Hanning d'Ordre 2 (Figure 6) permet une meilleure observation des fluctuations interannuelles en éliminant les variations saisonnières.

De l'analyse de ces indices, on observe une alternance de périodes humides et de périodes sèches. La période de 1986-1992, est marquée par des conditions de sécheresse avec des indices en 1986 (-2,06) et 1987 (-1.38) qui pointent vers de fortes valeurs négatives tandis que la période de 1993-2004 est une période très humide avec l'enregistrement en 2003, d'un indice pluviométrique de +1,81(valeur maximale de la série étudiée). De 2005-2016 on assiste à une période où les valeurs des indices sont majoritairement négatives sauf en 2009,2010 (années marquées par une humidité modérée) et 2016 (marquée par une humidité légère $I_p = 0,42$).

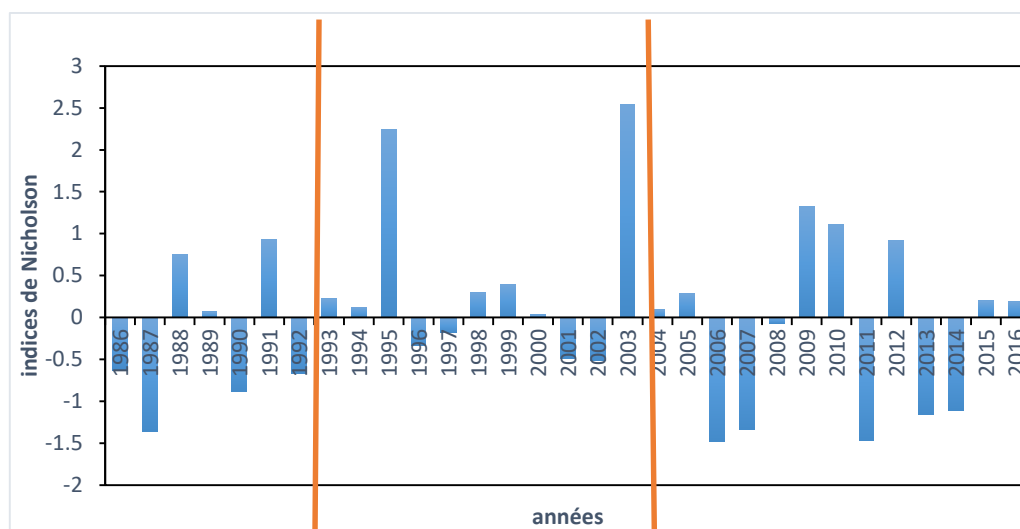


Figure 5: indices pluviométriques de Nicholson

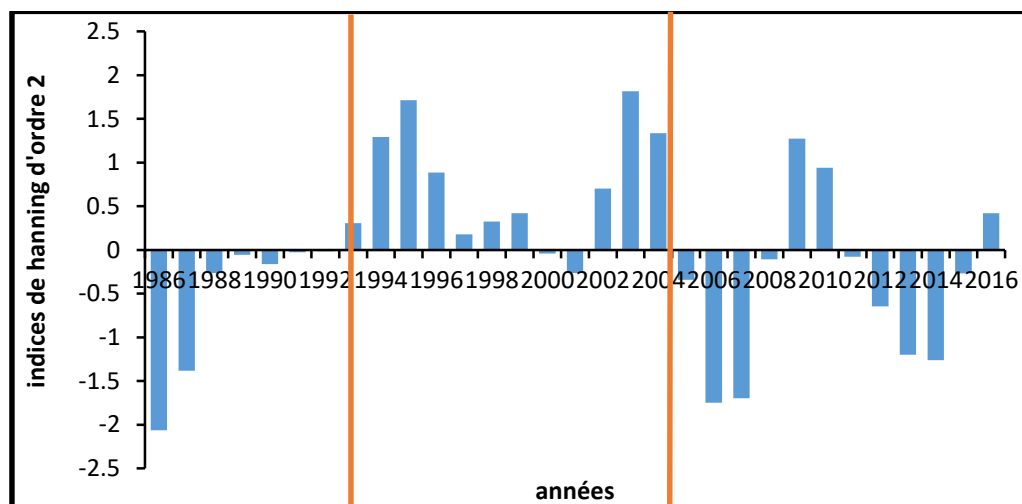


Figure 6: indices pluviométriques du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2

2.2.3 Variabilité hydrologique

La figure 7 présente la variabilité des débits moyens annuels dans le bassin de Wêwê de 1986 à 2016. Il ressort de l'analyse de cette figure que les débits les plus faibles sont observés au cours des années 1987, 2013 et 2015. Les tests de détection de rupture ont été appliqués à la série. La procédure de segmentation de Hubert ne présente aucune rupture dans la série chronologique tandis que la méthode bayésienne d'A.F.S. LEE et S.M. HEGHINIAN présente une rupture au cours de l'année 1987, même année que celle de la série pluviométrique avec une probabilité de 0.17.

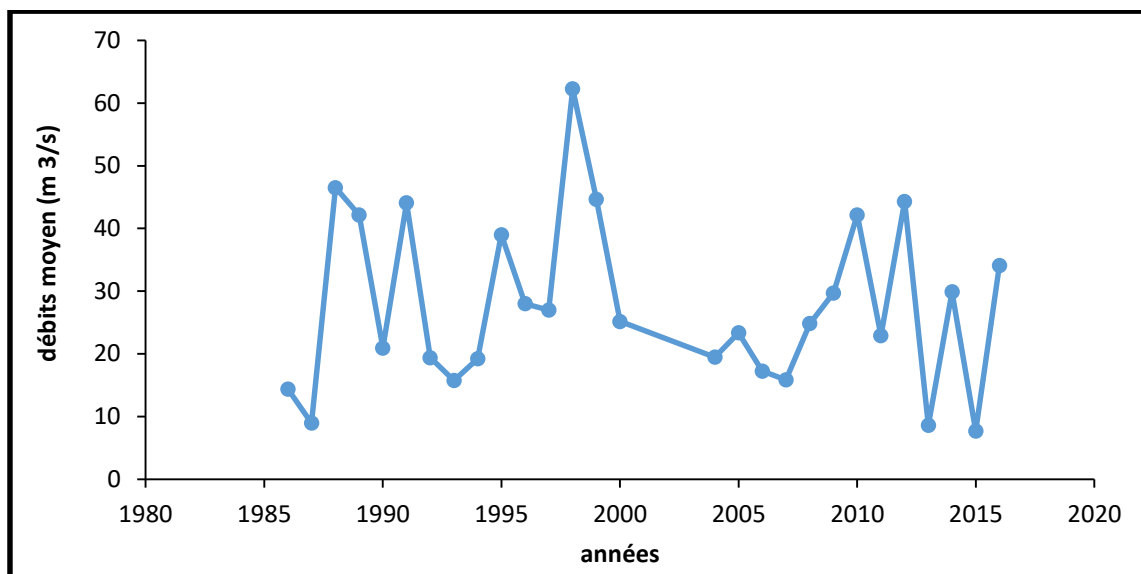


Figure 7: Variabilité des débits moyens annuels dans le bassin de Wêwê

2.2.4 Evolution des indices hydrologiques

La figure 8, présente l'évolution des indices hydrologiques. La période de 1986-1987 est une période marquée par des indices avec de fortes valeurs négatives. Cette période est suivie d'une période allant de 1988 à 2016 constituée d'une alternance d'indices positifs et négatifs avec en son sein des indices positives de fortes amplitudes allant de 1995 à 2000.

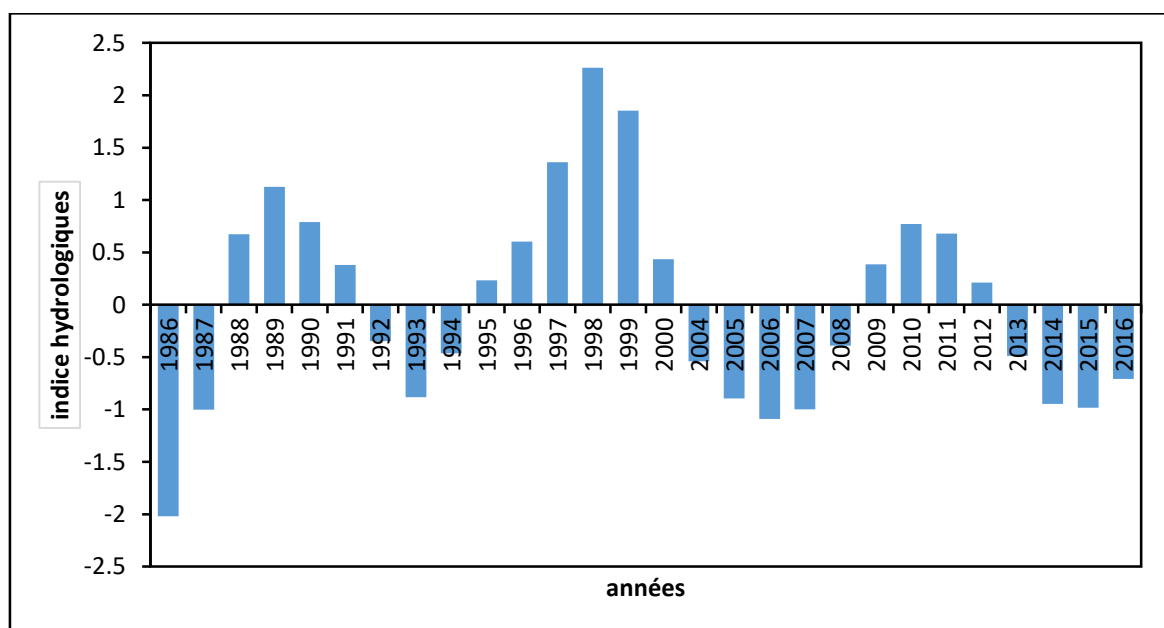


Figure 8: Evolution des indices hydrologiques dans le bassin de Wêwê

2.3 Evaluation de la disponibilité en eau du barrage

✓ Bilan hydrologique

Le bilan d'eau dans une retenue est une étape primordiale pour une étude de gestion et de planification des ressources en eau. Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du barrage de Djougou nous avons calculé les paramètres du bilan hydrologique sur la période de 2014 à 2015.

Le tableau 1 montre les résultats du bilan hydrologique réalisé sur le barrage de Djougou sur la période de 2014 à 2015. L'analyse du tableau 1, indique que l'apport par précipitations sur le barrage est de 209.556,25 m³ tandis que celui par ruissellement est de 6131,05 m³ soit un volume entrant total de 215.687,28 m³ dans le barrage sur la période de 2014-2015. Les pertes par évaporation, les pertes par infiltration et les prélèvements pour divers usages sont respectivement de 185.877,41 m³ ; 6889,59 m³ et 173.035 m³ pour un volume total sortant de 365.802 m³. On constate de ce fait que le volume entrant est inférieur au volume sortant. Les pertes par évaporation qui sont de 185.877,41 m³ représentent 51,12% du volume total sortant du réservoir, les différents usages, (170845m³ pour l'AEP et 2190 m³ pour l'arrosage des plans) représentent 47.30% et les pertes par infiltration très faibles compte tenu de la nature du sol représentent 1.67%. Le tableau 5 suivant renseigne sur le bilan effectué au niveau du barrage de Djougou.

Tableau 6 : Récapitulatif des composantes du bilan sur le barrage de Djougou sur la période de 2014 à 2015

Composantes du bilan en (m ³)	2014 - 2015
Apports par précipitations	209.556,25
Apport par ruissellement	6131 ,04
Volume total entrant	215.687,28
Perte par évaporation	185.877,41
Perte par infiltration	6889,59
Prélèvement pour divers usages	173.035
Volume total sortant	365.802
Volume initial du réservoir	58.670
Volume final du réservoir	251.437
Variation du volume du réservoir	-147.924,71

2.4. Modélisation de l'allocation et les besoins en eau de la population

Le modèle utilisé pour l'allocation ne peut fournir des résultats satisfaisants sans être en adéquation avec la réalité. A cet effet la performance du modèle WAEP a été testé par le critère de Nash à partir des valeurs mensuelles des volumes observés et simulés par WEAP. Le coefficient de Nash obtenu après calcul est de 0.99 en calage et en validation. Ce modèle est alors jugé performant pour la planification de la ressource en eau du barrage de Djougou. La figure 9 ci-après montre les courbes de volume observé et simulé au pas de temps mensuel au niveau du barrage de Djougou.

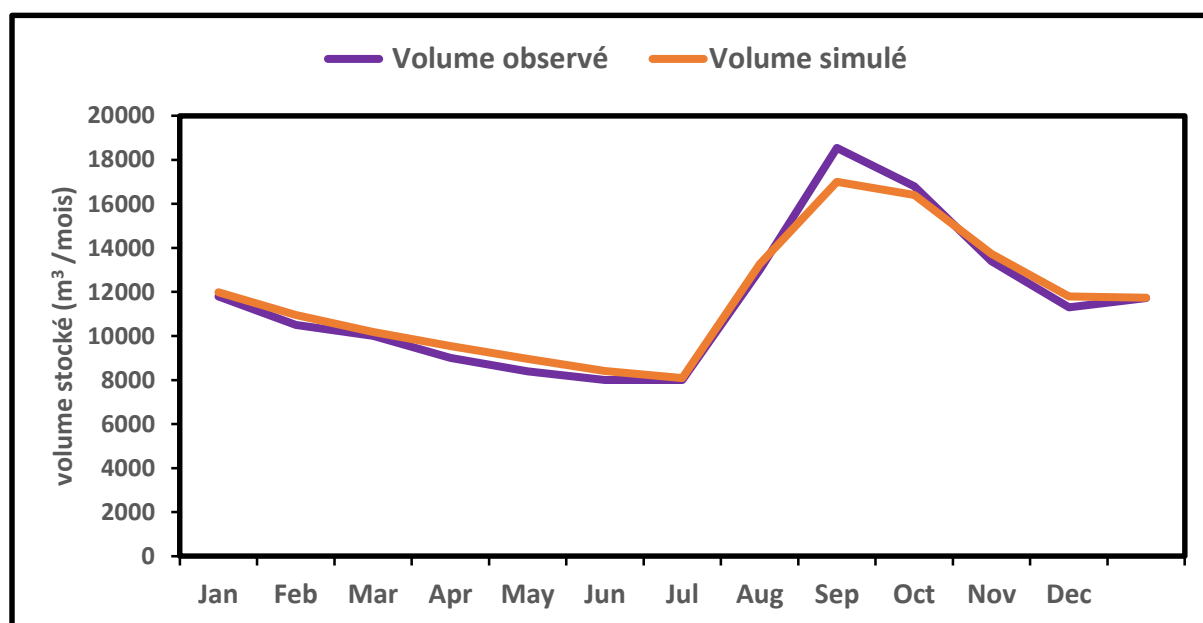


Figure 9: courbes des volumes observés et simulés

2.4.1. Impact des prélèvements sur le barrage de Djougou

La figure 10 montre l'évolution mensuelle de la demande en eau et du volume moyen d'eau stocké dans la retenue. A l'analyse de cette figure, on constate que le volume d'eau du lac diminue progressivement de janvier à juillet et d'octobre à décembre tandis qu'il augmente pendant les mois d'août et septembre avec un maxima au mois de septembre. Ces deux mois correspondent à la période de crues où la demande en eau de la population est très faible. Par contre la demande en eau augmente durant les mois de janvier à juillet avec notamment une diminution au mois d'août, qui est plus ou moins accentuée au mois de novembre et décembre.

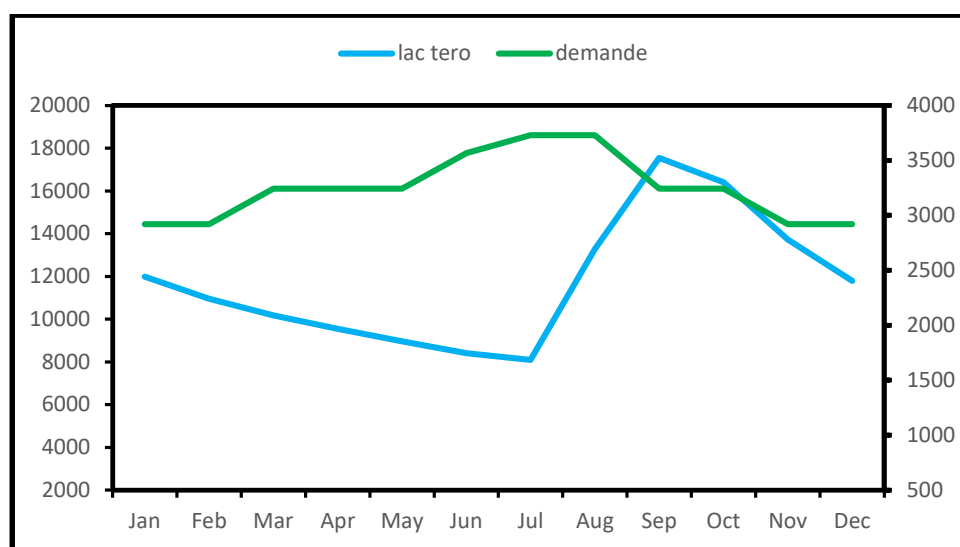


Figure 10: Evolution mensuelle de la demande et du volume d'eau stocké dans la retenue

2.4.2 Demande en eau basé sur le taux d'accroissement de la population

Dans cette partie la demande en eau est faite en se basant sur le taux d'accroissement de la population. A ce niveau nous allons analyser la demande en eau pour un taux d'accroissement de 3.5% et 5%.

La figure 11 ci-dessous montre l'évolution de la demande en eau annuelle de 2015 à 2050 pour un taux d'accroissement de la population de 3.5%. L'analyse de cette figure indique que la demande en eau pour les besoins de la population augmente progressivement de 2025 à 2050. Cette augmentation est de 30% en 2025 pour un volume de 29.446.000 m³ et 97% en 2050 pour un volume de 72.000.000 m³. On note ainsi que l'augmentation de la demande pour ce taux d'accroissement est légère par rapport à celle du scénario de référence dont le volume est de 63.618.000 m³ en 2050.

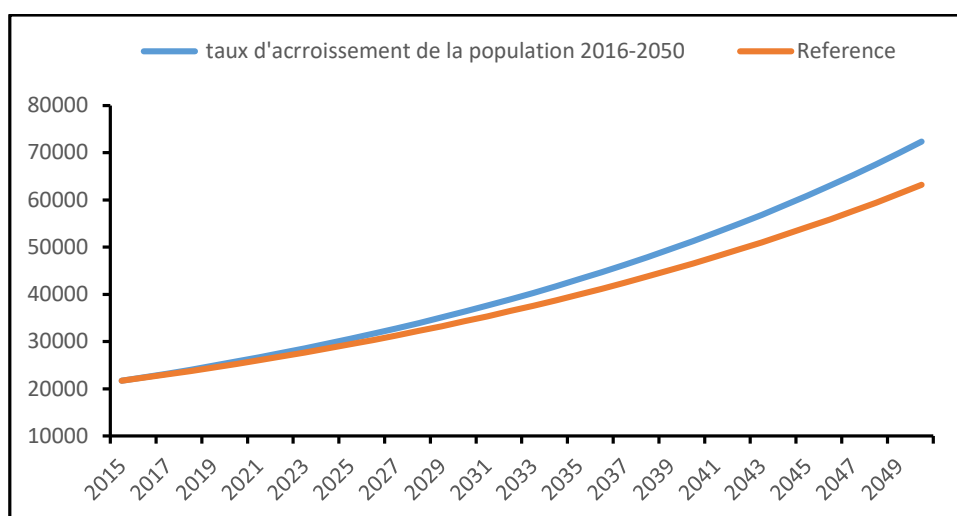


Figure 11: Evolution de la demande basée sur un taux d'accroissement de la population (3.5%).

2.4.3 Demande en eau base sur un fort taux d'accroissement de la population

Le figure 12 ci-après a pour objectif de montrer l'évolution de la demande en eau de la population à un fort taux d'accroissement. De son analyse on remarque une augmentation progressive de la demande en eau au fur et à mesure que les années avancent. De même la comparaison de la demande en eau pour le scénario fort taux d'accroissement et le scénario de référence montre que la demande en eau en 2050 va doubler par rapport au scénario de référence.

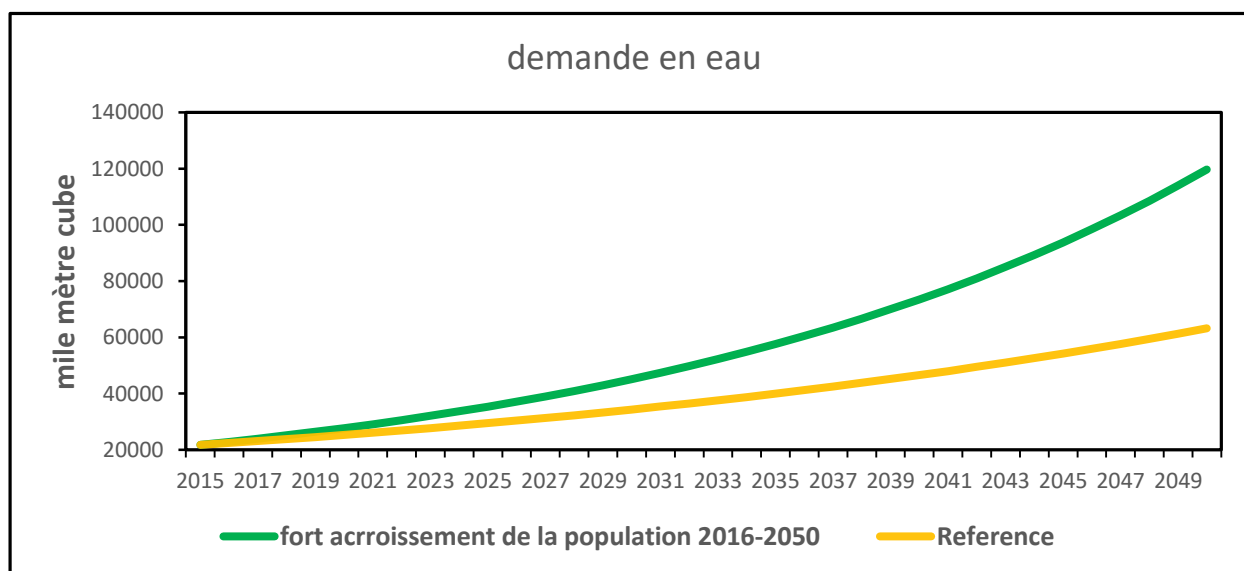


Figure 12: évolution de la demande en eau pour un fort taux d'accroissement.

2.5. DISCUSSION

La caractérisation de la variabilité climatique sur la station de Djougou de 1986 à 2016 a permis de voir son impact sur la disponibilité des ressources en eau du barrage. Les méthodes statistiques appliquées aux séries pluviométriques et hydrométriques révèlent qu'il existe une rupture en 1987 aussi bien dans la série pluviométrique que dans la série hydrométrique.

Aussi le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles entraînant ainsi une succession de périodes sèches allant de 1986-1992 et humides au cours de la période de 1993-2004. Ces phénomènes ont suscité des modifications entraînant une baisse des précipitations qui s'accompagne d'un déficit des écoulements. Ces résultats sont conformes avec ceux de Vissin (2007) et Soro et al. (2011). Ces auteurs ont montré que les chroniques pluviométriques ont connu des ruptures de stationnarité accompagnées d'une baisse des pluies causant ainsi des déficits d'écoulement respectivement sur le bassin du Niger au nord du Bénin et en Côte d'Ivoire dans le degré carré de Grand-Lahou. De tels résultats entrent aussi en concordance avec les études réalisées sur le programme de développement communal de (2018 à 2022).

De même les résultats du bilan hydrologique effectué sur la période de 2014-2015 ont montré que la quantité d'eau précipitée et ruisselée sur le barrage de Djougou est faible. Cette situation est peut-être liée à la modification du régime pluviométrique. Dans son étude sur la simulation et l'optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne au Burkina Faso, Fowe (2015) a également montré que le régime hydrique de ce barrage connaît une grande variabilité, due principalement aux irrégularités des apports qui sont contrôlés par la pluviométrie. A cela s'ajoute une forte évaporation d'eau sur la retenue. A cet effet (Liebe (2002), cité par Chabi (2019)), indique que l'évaporation est considérée comme un facteur prépondérant dans la diminution des stocks d'eau des réservoirs. Lo et Escourrou (1991), estiment que, l'évaporation directe constitue un grand frein à la pérennité des eaux stockées. La mesure des termes du bilan hydrologique nécessite une multitude d'approches, dont chacune est source d'incertitude. Une variation annuelle négative du volume du réservoir est observée au terme de ce bilan (les volumes entrants sont inférieurs aux volumes sortants). Cette observation est peut-être due aux incertitudes liées aux approches utilisées ou encore à certaines données non prises en compte lors de l'estimation des paramètres.

Par ailleurs il a été constaté une diminution accentuée de la demande en eau aux mois de novembre et décembre. Cette période indique la période de sécheresse marquée par le début de l'harmattan. En projection, l'allocation et les besoins en eau des populations révèle que sur le barrage la ressource en eau diminue tandis que la demande pour les besoins des populations augmente au fur et à mesure que les années avancent. Dans son travail, sur l'analyse et la modélisation du cycle hydrologique continental au Bénin dans le bassin de l'Ouémé à Bétérrou, Zannou (2011) a montré que la commune de Djougou affiche déjà un large besoin en eau potable car elle est considérée comme l'une des plus grandes villes à l'échelle du bassin versant.

2.6. Conclusion

Au terme de ce chapitre nous avons constaté que le climat a connu une grande variabilité. Les séries pluviométriques et hydrologiques présente une rupture en 1987. Les périodes humides se situent globalement à partir de 1993 à 2004 et de 2009 à 2010 laissant place aux périodes sèches à partir des années 1986 à 1992, 2005 à 2008 et 2011 à 2015. On note ainsi une répercussion sur les écoulements au niveau de la station de Djougou. L'établissement du bilan hydrologique constitue une étape importante pour l'optimisation de la gestion du réservoir. Le bilan global sur la période de suivi hydrologique a indiqué : un faible apport par précipitation et par ruissellement et une forte perte par évaporation. Les besoins en eau des populations, augmentent au fur et à mesure que les années avancent entraînant ainsi une diminution du volume d'eau stocké au niveau du barrage.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Comme la plupart des pays de l'Afrique de l'ouest, le Bénin est aussi victime des changements climatiques. Notre étude réalisée dans le département de la Donga plus précisément dans la commune de Djougou met en évidence le phénomène de la variabilité climatique et donne une idée de son impact sur la disponibilité en eau du barrage de Djougou pour les besoins des populations.

Ainsi nous avons dans un premier temps caractériser l'impact de la variabilité climatique à la station de Djougou et nous avons ensuite évalué la ressource en eau disponible à travers un bilan hydrologique. L'étape suivante a consisté à modéliser avec le logiciel WEAP l'allocation et les besoins en eau des populations. Les résultats indiquent que les méthodes statistiques que sont la méthode de segmentation d'Hubert appliquée aux séries pluviométrique et hydrométrique ne présente aucune rupture tandis que celle d'A.F.S. Lee et S.M. Heghinian montre une rupture aussi bien dans la série pluviométrique que dans la série hydrométrique au cours de l'année 1987 pour la période de 1986 à 2016. Le calcul de l'indice de Nicholson et du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 a permis de mettre en évidence les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques en relevant les périodes humides et sèches pour les pluies.

Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de la conservation des matières montre un faible apport par précipitation et par ruissellement sur la retenue mais une forte perte par évaporation, soit 185.877,41 m³ en 2015. L'application du modèle d'allocation de l'eau du barrage de Djougou pour les besoins des populations a montré une bonne performance dans la simulation des données. Ainsi la capacité de stockage de la retenue était de 251.437 m³ en 2015. En projection, les demandes en eau futur ont connu des variations dans ce secteur. Ces variations sont pour la plupart du temps conditionnées à des dotations basées sur le taux d'accroissement de la population. On note un volume de 63.618.000 m³ d'eau en 2050 pour un taux d'accroissement de 3,5% et un volume de 120.000.000 m³ d'eau, pour un accroissement porté à 5%, soit le double de la demande par rapport à la période de référence.

La revue des différents résultats obtenus nous montre que les hypothèses énoncées plus haut sont vérifiées.

PERSPECTIVES ET SUGGESTIONS

Au vu des résultats de notre étude le logiciel WEAP est un outil très efficace pour l'évaluation et la planification des ressources en eau. Néanmoins il est important de prendre des dispositions pour une meilleure connaissance des ressources en eau. Un réservoir serait susceptible de fournir une information de qualité et de quantité relativement satisfaisantes si certaines conditions sont réunies

- Installer et veiller au bon fonctionnement des stations hydrométriques sur les cours d'eau principaux en amont et à l'exutoire du barrage.
- Installer une station météorologique /capteurs afin de faciliter les enregistrements des données climatiques à Djougou ;
- Installer une station limnimétrique permettant de mesurer périodiquement les hauteur d'eau du barrage.
- Faire un contrôle effectif des divers prélèvements pour utilisation.
- Poursuivre cette étude en prenant cette fois ci en compte certains aspects de la quantité (l'agriculture, l'élevage...etc) et la qualité de la ressource en eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- Alamou, E. A., & Quenum, G. M. (2016). *Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Bénin*. April.
- 2-Bahin, E., Baudet, Y., Haida, S., Probst, J., Bahin, E., Baudet, Y., Haida, S., & Analyse, J. P. (2017). *Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d' une rivière de zone semi-aride : Le Sebou Au Maroc* To cite this version : HAL Id : hal-01521936.
<https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n5p509>
- 3-CHABI, A. (2019). *Gestion integree des ressources en eau de l' oueme a l' exutoire du pont de save dans un contexte des changements climatiques : application a la mise en valeur du reservoir de ILAUKO* Prof Abel AFOUDA Université d' Abomey -Calavi (UAC), BENIN Faculté.
- 4-DJOMBO, V. (2010). *Evaluation et allocation des ressources en eau pour le developpement agricole et economique dans le bassin du fleuve bandama: contribution du modele weap*.
- 5- FOWE, T. (2009). *Gestion integree des ressources en eaux dans le bassin versant du lac municipal de dschang-cameroun : connaissance et usages*.
- 6- Gloria, H., & Mod, S. U. (2020). *Evaluation des données satellites TRMM pour la modélisation des debits de l'ouémé à BONOU*.
- 7- HONVOH, P. (n.d.). *ETUDE DE RENFORCEMENT ET D' OPTIMISATION DU RESEAU D' ADDUCTION*.
- 8- Jean-luc, P. (2017). *Analyse De La Variabilite Hydroclimatique Et Impacts Des Barrages Sur Le Regime Hydrologique D' une Riviere De Zone Semi-Aride : Le Sebou Au Maroc*. 13(5), 509–525.
<https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n5p509>
- 9-Kouame, G. U. (2010). *Etude d'optimisation pour l'exploitation des barages au Nord du Burkina FASO: Cas du barrage de GUITTI*.
- 10- OKOUNDE, J.-E. (2010). *Mémoire pour l'obtention du master spécialisé en gestion intégrée des ressources en eau*.
- 11- RAZANAMAHANDRY, C. (2013). *ELABORATION D' UN OUTIL D' EVALUATION ET DE PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DES RETENUES HYDRO-AGRICOLES : APPLICATION DU MODELE WEAP A LA RETENUE DE KIERMA*.
- 12- SORO, Tanina, OGA, Y. (n.d.). *La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)*.
- 13- Tazen, F. (2015). *Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne du Burkina Faso*.
- 14- VISSIN, E. (2010). *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*.
- 15- ZANNOU, A. (2011). *Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin Cas du Bassin de l' Ouémé à Bétérou* Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA - Chaire UNESCO) Par Arnaud Brun.

ANNEXE I

Tableau 6 : données de la courbe hauteur-volume initial du lac Téro (barrage de Djougou)

Côte (m)	S (ha)	H (m)	V (10 ³ . m ³)
417	0,09	0	0,10
417,5	0,74	0,5	2,44
418	2,50	1	10,86
418,5	4	1,5	28,22
419	7	2	58,67
419,5	10	2,5	102,08
420	12	3	157,02
420,5	15	3,5	223,59
420,6	16	3,6	238,81
420,65	16	3,65	246,66
420,68	16	3,68	251,44

ANNEXE II

Tableau 7 :données des évapotranspirations et évaporations annuelles

Années	Evapotranspiration ETP (mm)	coefficient a	Evaporation (mm)
1986	1041.35946	1	1041.4
1987	1061.60809	0.91983097	976.5
1988	1045.94828	1	1045.9
1989	1034.48811	1	1034.5
1990	1045.30536	1	1045.3
1991	1038.93712	1	1038.9
1992	1037.14257	1	1037.1
1993	1040.93065	1	1040.9
1994	1041.24446	1	1041.2
1995	1044.54364	1	1044.5
1996	810.155845	1	810.2
1997	1043.57662	1	1043.6
1998	1060.13149	1	1060.1
1999	1046.01894	1	1046.0
2000	1045.28544	1	1045.3
2001	1053.64298	1	1053.6
2002	1052.75758	1	1052.8
2003	1060.87391	1	1060.9

2004	1051.44356	1	1051.4
2005	1067.44666	1	1067.4
2006	1076.84987	0.8830386	950.9
2007	1068.72953	0.91818015	981.3
2008	1067.10672	1	1067.1
2009	1063.42624	1	1063.4
2010	1062.42646	1	1062.4
2011	1052.50422	0.90697974	954.6
2012	1044.23454	1	1044.2
2013	1052.48084	0.97037396	1021.3
2014	1049.78719	0.98315164	1032.1
2015	1056.36329	1	1056.4
2016	1054.8205	1	1054.8

ANNEXE III

Tableau 8 :demande en eau en fonction de la population actualisée

année	Population actualisée	Demande en eau (10 ³ m ³)	année	Population actualisée	Demande en eau (10 ³ m ³)
2015	4501920	21699	2031	6376936	47367
2016	4600962	22784	2032	6517229	49735
2017	4702183	23923	2033	6660608	52222
2018	4805631	25120	2034	6807141	54833
2019	4911355	26376	2035	6956898	57575
2020	5019405	27694	2036	7109950	60453
2021	5129832	29079	2037	7266369	63476
2022	5242688	30533	2038	7426229	66650
2023	5358027	32060	2039	7589606	69982
2024	5475904	33663	2040	7756578	73481
2025	5596374	35346	2041	7927222	77155
2026	5719494	37113	2042	8101621	81013
2027	5845323	38969	2043	8279857	85064
2028	5973920	40917	2044	8462014	89317
2029	6105346	42963	2045	8648178	93783
2030	6239664	45111	2046	8838438	98472
2047	9032884	103396	2049	9434702	113994
2048	9231607	108565	2050	9642266	119693