

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU**

=====

Mémoire de fin de formation Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE PROFESSIONNELLE EN HYDROLOGIE

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

=====

Thème :

**VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE : IMPACTS SUR LES
RESSOURCES EN EAU ET ALLOCATION AUX
POPULATIONS DU MONO**

Présenté par :

DJOUHOUNTOU S. R. HIPPOLYTE

Superviseur :

Dr CHABI AMEDEE



Promotion : 2020-2021

CERTIFICATION

Nous soussignés :

- ✓ Président du jury : **Dr DOSSOU-OLORY AUDACE**, chercheur à l'Université de Johannesburg (Afrique du Sud) et professeur assistant à l'Institut National de l'Eau/Université d'Abomey Calavi (Bénin), Ingénieur en Génie Electrique ;
- ✓ Membres :
 - **Docteur N'TCHA M'PO** : Enseignant chercheur à l'Institut National de l'Eau à l'Université d'Abomey Calavi (UAC), Hydrologue, Géostatistique ;
 - **Docteur CHABI AMEDEE** : Enseignant chercheur à l'Institut National de l'Eau et à la Chaire Internationale en Physique Mathématique et Application (CIPMA/Chaire UNES) à l'Université d'Abomey Calavi (UAC), Hydrologue ;

Jury chargé de juger le mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de licence professionnel en Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau (HGRE) de Monsieur **DJOUHOUNTOU Hippolyte Sewanoudé Rasbéry**, certifie que les différents apports et contributions énoncés au cours de la soutenance tenue le vendredi 03 mai 2024 de 15h à 16h 30min dans la salle A3 de l'institut national de l'eau, ont été intégrés au document pour l'amélioration de la qualité scientifique et esthétique de ce dernier.

En foi de quoi, le présent certificat lui est délivré pour service et valoir ce que de droit.

Président du jury

Dr AUDACE DOSSOU-OLORY

Examineur

Dr N'TCHA M'PO

Rapporteur

Dr CHABI AMEDEE

DEDICACE

Je dédie ce travail,

A ma famille, elle qui m'a inculqué une éducation digne, m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Particulièrement,

✚ A mon père DJOUHOUNTOU Assogba et Ma mère Simone TOSSAVI, Source de vie et d'affection, d'espoir et de motivation, je témoigne mon amour mon respect et ma gratitude pour leurs grands sacrifices.

✚ A mes parrains Léon AHOMAGNON, Victoire ABAHI et mon oncle Hubert TOSSAVI

✚ A tous mes frères Vivien, Rodrigue, Hyacinthe et à ma sœur Rosemonde.

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 pas pu voir le jour sans l'encadrement et les encouragements de maintes personnes. Qu'il me soit permis ici de leur exprimer mes remerciements.

- ✚ Au Dr. Amedée CHABI mon Maitre de mémoire, qui malgré ses multiples occupations à accepter l'encadrement de ce travail et pour ses conseils scientifiques. Dieu vous bénisse abandonment;
- ✚ Au Prof. Flavien DOVONOU, le Chef du Département d'hydrologie et gestion des ressources en eau, pour ses efforts consentis dans la formation des étudiants ;
- ✚ A nos enseignants qui ont partagé leurs connaissances avec nous durant notre formation ;
- ✚ Aux honorables membres du jury qui contribueront à l'amélioration de ce travail ;
- ✚ A tous mes camarades d'hydrologie pour l'atmosphère conviviale qui a régnée tout au long de cette formation ;
- ✚ A tous mes aînés d'hydrologie, en particulier EHOUINSOU Fructueux, HOUNNONDAHO Freddy et NANA Alexis pour les explications et conseils procurés ;
- ✚ A ma petite amie GBODO Camélia pour son encouragement et son soutien, à tous les membres de ma famille, HOUZAVI Paul ; aux personnes qui de près ou de loin ont veillés à l'aboutissement de ce travail.

RESUME

Le bas-Benin connaît des variabilités sur les régimes pluviométriques dans son ensemble depuis les années 1970, tant leurs impacts sont nettement perceptibles. La présente étude aborde la variabilité pluviométrique et ses impacts sur les ressources en eau et les populations du Mono. Pour atteindre les objectifs escomptés, les données climatiques : la pluviométrie, les températures, le vent, l'humidité à la station de Bopa, Grand popo, Ouidah et les débits à l'exutoire de Athiémé ont été collectées à l'échelle journalière. Les données relatives à l'eau brute pompée à partir des forages et démographiques ont été également collectées. La méthodologie utilisée est basée sur deux parties essentielles : l'étude de la variabilité pluviométrique et la modélisation de l'allocation de l'eau par WEAP. Les indices centrés réduits de Hanning et les indices de Nicholson ont permis d'analyser et de montrer l'évolution mensuelle du rythme pluviométrique. Le calage du modèle hydrologique dans WEAP a été fait et apprécié à partir des critères statistiques (NSE, KGE et RMSE). L'outil a été utilisé pour simuler et modéliser l'allocation de l'eau à l'horizon 2050.

Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une alternance d'épisodes sèches et des épisodes humides suivie des déficits pluviométriques par rapport à l'évolution des rythmes pluviométriques. La méthode statistique de Lee et Heghinian appliquée indiquée une rupture nette pour les années 1991, 2014 et 2017 respectivement sur les stations de Bopa, Ouidah et Grand popo. La performance du modèle WAEP est jugée satisfaisante à partir des critères statistiques et confirme l'observation visuelle des courbes de débits observés et simulés avec un Nash de 0.78 en calage et 0.77 en validation. En projection, les demandes en eau futures pour les populations de Granp Popo et Comè ont connu des variations à partir de 2025 à 2050. Ces variations sont pour la plupart du temps conditionnées à des dotations basées sur le taux d'accroissement de la population.

Mots clés : variabilité pluviométrique, ressource en eau, modèle et logiciel WEAP.

ABSTRACT

Lower Benin has experienced variability in rainfall patterns over all since the 1970s, with noticeable impacts. This study addresses rainfall variability and its effects on water resources and the populations of Mono. To achieve the intended objectives, climate data including rainfall, temperature, wind, and humidity were collected daily from the Bopa, Grand Popo, and Ouidah stations, as well as discharge data from the Athiémé outlet. Data on raw water pumped from boreholes and demographic information were also gathered. The methodology used is based on two essential parts : the study of rainfall variability and the modeling of water allocation using WEAP. Centered reduced Hanning indices and Nicholson indices were used to analyze and demonstrate the monthly evolution of rainfall patterns. The calibration of the hydrological model in WEAP was performed and assessed based on statistical criteria (NSE, KGE, and RMSE). The tool was then used to simulate and model water allocation for the year 2050.

The results obtained showed an alternation between dry and wet episodes, followed by rainfall deficits relative to the evolution of rainfall patterns. The statistical method of Lee and Heghinian indicated a clear break for the years 1991, 2014, and 2017 at the Bopa, Ouidah, and Grand Popo stations, respectively. The performance of the WEAP model is considered satisfactory based on statistical criteria and confirms the visual observation of the curves of observed and simulated discharges, with a Nash score of 0.78 for calibration and 0.77 for validation. In projections, future water demands for the populations of Grand Popo and Comè are expected to vary from 2025 to 2050. These variations are largely conditioned by allocations based on population growth rates.

Keywords : rainfall variability, water resources, WEAP model and software.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AEP : Approvisionnement en Eau Potable

DGEau : Direction Générale de l'Eau

INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

SONEB : Société Nationale des Eaux du Bénin

UNFCCC: United Nations Frameworks Convention on Climate Change

WEAP: Water Evaluation and Planning System

IDE : Environnement de Développement Intégré

SEI : Institut de l'Environnement de Stockholm

ENSO : Oscillation Décennale du Pacifique

AMO : Oscillation Atlantique Multi Décennale

ET0 : Evapotranspiration de Référence ou Evapotranspiration Potentielle

LWD: Division Land and Water Development

FAO: Food and Agriculture Organisation of the United Nations

NSE : Critère de Nash-Sutcliffe

PBIAIS : Pourcentage de Biais Noté

RMSE : Erreur Quadratique Moyenne

MABIA : Management Algorithm for Balanced Irrigation Analysis

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Volume d'eau distribué à la population	18
Tableau 2: Nomenclature de l'indice de Nicholson.....	21
Tableau 3: Paramètres de base pour la modélisation des besoins en eau de la population.....	24
Tableau 4: Critères de performances au calage et à la validation	35
Tableau 5 : Données de débits entrant et sortant des types de la zone (mètre cube)	xv
Tableau 6 : Evolution des demandes en eau	xv
Tableau 8 : Variation mensuelle et consommation en eau	xvii

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du département du Mono	13
Figure 2: Carte du réseau hydrographique du département du Mono	15
Figure 3: Schéma conceptuel de modélisationn par WEAP du département du Mono....	28
Figure 4: Pluviométrie intermensuelle des stations de Bopa, Grand-Popo et Ouidah.....	32
Figure 5: Indices pluviométriques de Nicholson.....	33
Figure 6: Indices pluviométriques du filtre passe - bas de Hanning d'ordre 2	34
Figure 9: Débits observés et simulés en calage : 1991 à 2000	36
Figure 10: Débits observés et simulés en validation : 2001 à 2022	36
Figure 11: Variation mensuelle de la moyenne des pluie entrant, débit sortant et l'évaporation sur le bassin.....	37
Figure 12: Evolution des demandes non satisfaites des villes de comè et Grand-Popo.....	38
Figure 13: Evolution de la demande en eau de la ville de Comè	39
Figure 14 : Evolution de la demande en eau de la ville de Grand-Popo	40

TABLE DES MATIERES

CERTIFICATION	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
TABLE DES MATIERES	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Contexte et justification de l'étude	3
2. Revue de littérature	4
2.1. Clarification conceptuelle	4
2.2. État des connaissances	6
3. But de la recherche	10
4. Problématique et question de recherche	10
5. Objectif du mémoire	10
5.1. Objectif général.....	10
5.2. Objectifs spécifiques.....	11
6. Hypothèses de travail	11
7. Résultats attendus de l'étude et cibles	11
8. Grande division du mémoire	11
CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES	12
1.1 Introduction.....	13
1.2. Milieu d'étude	13
1.2.1. Localisation	13
1.2.2. Géomorphologie et géologie.....	14
1.2.3. Hydrologie.....	15
1.2.4. Sols, végétation, climat et hydrographie.....	16
1.2.5. Quelques aspects socio-économiques	16
1.3. Données utilisées	17
1.3.1. Données climatiques	17

1.3.2. Données hydrométriques.....	18
1.3.3. Données de l’approvisionnement en eau potable (AEP)	18
1.3.4. Données caractéristiques de l’aquifère	18
1.3.5. Données démographiques.....	18
1.4. Matériels utilisés	19
1.5. Méthodes	20
1.5.1. Collecte des données	20
1.5.2. Contrôle de la qualité des données	20
1.5.3. Méthodes de traitement des données	21
1.6. Conclusion	29
CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION	30
2.1. Introduction.....	31
2.2 Variabilité climatiques	31
2.2.1. Variabilité intermensuelle des précipitations	31
2.2.2 Evolution des indices de précipitations.....	33
2.2.3. Détection de rupture dans les séries pluviométriques.....	34
2.3. Modélisation de l’allocation et les besoins en eau de la population	35
2.3.1. Evolution du volume d’eau.....	35
2.3.2. Calage et validation du modèle.....	35
2.3.3. Débit entrant et sortant	37
2.3.4. Evolution des demandes non satisfaites de la ville de comè et grand popo	38
2.3.5. Demande en eau basée sur le taux d’accroissement de la population	38
2.4. Discussion	40
2.5. Conclusion	41
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	42
CONCLUSION GENERALE	43
PERSPECTIVES ET SUGGESTIONS	44
Bibliographie	xi
ANNEXE I	xv
ANNEXE II.....	xv
ANNEXE III	xvii

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Depuis le début des années 1970, on observe de grandes modifications du régime des précipitations en Afrique de l'Ouest. En effet la pluviométrie est le paramètre climatique le plus fréquemment observé dans les réseaux de mesures météorologiques au sol et qualifiée de « variable rebelle » compte tenu de sa grande variabilité spatio-temporelle (Ahouanton, 2004). La bonne répartition des pluies a donc une importance particulière pour les activités socio-économiques, les écosystèmes naturels et anthropiques. Ainsi, les écosystèmes et les systèmes humains du Bénin souffrent de graves dégradations du fait de la forte variabilité climatique associée à la fréquence des phénomènes extrêmes (Kouton, 2022). Il convient de souligner que depuis trois décennies, les régimes pluviométriques caractérisant les climats du Bénin connaissent des fluctuations parfois très prononcées au cours des saisons (Barbé et al., 1993) avec une rupture des pluies ayant marquée l'environnement et les activités humaines en particulier dans le bas-Bénin.

Ces conditions peuvent produire des impacts importants sur la gestion des ressources en eau. Une inquiétude grandissante vise 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 des besoins en eau pour la consommation, 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.

Aux vues de ces différents aspects, il est important de cerner les caractéristiques de la répartition pluviométrique et une mobilisation des ressources en eau afin de s'adapter au contexte de changements climatiques. Ces différentes observations constituent la réelle raison de notre présente recherche intitulée : « variabilite pluviométrique : impacts sur les ressources en eau et allocation aux populations du mono ». Dans cette perspective, nous aurons à évaluer les diverses ruptures sur certaines stations du département du Mono puis étudier les variabilités interannuelles et spatiales afin d'identifier les zones de fortes pluviométries et celles plus arides, ensuite faire une modélisation de l'allocation de l'eau aux populations du département.

Le présent mémoire s'articule autour de deux chapitres :

- le premier chapitre présente le milieu d'étude, la description des données utilisées, les matériels (logiciels) utilisés et la méthodologie adoptée ;
- le deuxième chapitre présente les résultats, la discussion et les perspectives.

1. Contexte et justification de l'étude

Dans certaines régions, l'eau a depuis toujours structuré l'évolution des sociétés humaines (Mouelhi, 2003). Aujourd'hui, la variabilité climatique est une réalité qui s'affirme avec des impacts notables sur les ressources en eau au moment où la demande devient de plus en plus prégnante. Depuis plus de quatre décennies, l'Afrique de l'Ouest est confrontée à une forte variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie (Servat et al. 1997 ; Paturel et Al. 1997-A ; Mahé et Al. 2001 ; Mahé, 2006).

Dans cette région, la maîtrise de l'eau est l'un des problèmes majeurs. La demande en eau ne cesse de croître, alors que les effets du changement climatique tendent à limiter sa disponibilité (Ardoin-Bardin, 2004). En effet, le Bénin présente des déficits pluviométriques assez significatifs et une augmentation de températures, ce qui se manifeste par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires (Paturel et al, 1998 ; Servat et al.,1999). Cette variabilité se caractérise aussi par de phases successives ou alternatives d'excédents et de déficits hydriques. Ses conséquences peuvent être durables sur le cycle hydrologique surtout lorsque la variabilité climatique se traduit par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau (Afouda et al., 2001). Plusieurs chercheurs Badou, 2016 ; Alamou et al., 2016 ; N'Tcha M'Po et al, 2018 ; Lawin et al., 2019 ; Houngué, 2020 ; etc. ont montré que la variabilité climatique impacts sur de nombreux aspects de l'environnement notamment sur les écoulements et l'agriculture, celle-ci vise une meilleure connaissance des effets potentiels de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau dans le département du Mono.

En effet, dans ce département, la question sur la disponibilité de l'eau se pose face aux conditions climatiques évoquées et constitue un défi majeur à relever pour le bien-être des populations. L'approvisionnement en eau potable dans le département est assuré par la SONEB à travers des forages. En dehors des puits traditionnels, l'eau d'alimentation provient essentiellement des forages. Pour satisfaire les demandes en eau de la population, Un débit de 3120 m³/jr est prélevé sur trois forages par la SONEB et est distribué suivant un taux de 75% pour la ville de Come et 25% pour la ville de Grand Popo.

De tout ce qui précède, le département du Mono est en proie à la variabilité climatique dont l'analyse des paramètres climatiques, l'allocation et la gestion de la ressource en eau est donc requise.

Aux vues de ces différents aspects, notre étude s'intéressera à montrer les impacts de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau et la population du Mono.

2. Revue de littérature

2.1. Clarification conceptuelle

Cette partie prend en compte la compréhension des termes utilisés dans cette étude.

✓ Ressources en eau

Une ressource en eau est une quantité d'eau disponible pour une utilisation humaine, agricole, industrielle ou écologique. En effet, les ressources en eau sont réparties en deux classes : Les eaux de surface et les eaux souterraines.

Les eaux de surface : elles sont constituées par les fleuves et rivières, les ruisseaux, les lacs et marais. Elles proviennent de l'eau de pluie tombée sur un bassin versant récepteur et/ou de vidange des nappes souterraines au niveau des sources.

Les eaux souterraines : c'est l'ensemble des eaux contenues dans le sous-sol. On distingue, les eaux adsorbées et pelliculaires non mobilisables et les eaux gravifiques ou gravitaires exploitables. L'origine des eaux souterraines peut être :

- météorique c'est-à-dire provenant des précipitations (pluie, neige, etc.) et de leur infiltration dans le sous-sol ;
- formé en profondeur dans la croûte terrestre à partir de 1 à 2 km ;

✓ Précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux provenant de l'atmosphère qui tombent à la surface de la terre sous forme liquide et solide (pluie, grêle, neige...). Une fois ses précipitations (pluies et neiges) arrivent à la surface de la terre, elles constituent une grande partie des apports d'eau du sol. Quand une pluie tombe au sol, trois processus prennent naissance : (i) l'infiltration avec l'humidification du sol et la recharge des nappes ; (ii) le ruissellement de surface ; et (iii) évapotranspiration.

✓ Pluviométrie

La pluviométrie est la mesure quantitative des précipitations, elle est importante pour de nombreux domaines, tels que l'agriculture, la gestion de l'eau, la climatologie, et l'hydrologie. La pluviométrie permet de suivre les variations des précipitations, et est utilisée pour évaluer les ressources en eau disponibles, de même pour détecter les tendances et d'analyser les régimes de précipitations (Van Vyve, 2006).

✓ **Variabilité pluviométrique**

La variabilité pluviométrique fait référence aux fluctuations naturelles des précipitations sur une période de temps donnée, à la fois en termes de quantité de pluie et de répartition temporelle. En d'autres termes, elle décrit les variations des motifs de précipitations d'une région ou d'un endroit spécifique au fil du temps.

Elle est un phénomène naturel qui peut être observé à différentes échelles, allant des variations saisonnières aux fluctuations interannuelles et même aux changements à long terme. Ces variations peuvent se produire à l'échelle locale, régionale ou mondiale et sont influencées par un certain nombre de facteurs complexes.

Les causes de la variabilité pluviométrique sont multiples, elles incluent les phénomènes météorologiques, les activités humaines, les déforestations, etc. Parmi les facteurs naturels, on retrouve les cycles climatiques à grande échelle tels que l'oscillation décennale du Pacifique (ENSO) et l'oscillation atlantique multi décennale (AMO), qui peuvent influencer les régimes de précipitations sur de larges étendues. Les variations de la température de surface des océans, les changements dans les courants atmosphériques et les phénomènes météorologiques tels que les systèmes de haute et basse pression peuvent également jouer un rôle dans la variabilité pluviométrique.

Les activités humaines peuvent également avoir un impact sur la variabilité pluviométrique. Par exemple, les émissions de gaz à effet de serre provenant de la combustion d'énergies fossiles peuvent contribuer au réchauffement climatique, ce qui peut entraîner des modifications des régimes de précipitations. De plus, la déforestation, l'urbanisation et les pratiques agricoles peuvent modifier localement les schémas de précipitations.

La variabilité pluviométrique a des implications importantes pour de nombreux aspects de la vie humaine et des écosystèmes. Elle peut influencer l'agriculture, la disponibilité en eau, les écosystèmes naturels, les ressources en eau douce, les risques de sécheresse et d'inondation, ainsi que la planification des infrastructures et des activités économiques. Les régions qui connaissent une variabilité pluviométrique élevée peuvent faire face à des défis tels que des sécheresses prolongées, des inondations soudaines, des perturbations des cultures et des ressources en eau limitées.

La compréhension de la variabilité pluviométrique est essentielle pour la planification et la gestion des ressources en eau, l'agriculture, la gestion des risques liés aux catastrophes

naturelles et l'adaptation aux changements climatiques. Les scientifiques utilisent des mesures et des observations des précipitations à long terme, ainsi que des modèles climatiques et des techniques statistiques, pour étudier la variabilité pluviométrique et en comprendre les mécanismes.

Il convient de noter que la variabilité pluviométrique est distincte du concept de changement climatique à long terme. Alors que la variabilité pluviométrique se réfère aux fluctuations naturelles à court terme des précipitations, le changement climatique se réfère à des modifications à plus long terme des conditions climatiques moyennes, y compris les régimes de précipitations. Cependant, la variabilité pluviométrique peut également être influencée par le changement climatique à long terme, ce qui rend l'étude de ces deux phénomènes étroitement liés.

En résumé, la variabilité pluviométrique décrit les variations naturelles des précipitations sur une période donnée, à la fois en termes de quantité et de répartition temporelle. Elle est influencée par des facteurs naturels tels que les cycles climatiques et les phénomènes météorologiques, ainsi que par des activités humaines telles que les émissions de gaz à effet de serre. Elle s'implique davantage dans de nombreux domaines de la société et des écosystèmes.

2.2. État des connaissances

« La variabilité spatio-temporelle des pluies » a fait l'objet de plusieurs études académiques. Il est donc nécessaire de présenter une synthèse des travaux antérieurs réalisés au Bénin comme dans plusieurs d'autres pays (thèses, mémoires, études, diverses publications et traités). Il s'agit en particulier des travaux ayant abordé d'une manière ou d'une autre le sujet de recherche et dont certains résultats ont été exploités.

- **Variabilité spatio-temporelle des hauteurs de pluies dans le bas-Bénin**

De tous les paramètres climatiques, la pluie est le plus déterminant en milieu tropical, en particulier en Afrique de l'Ouest (Atchadé, 2014). Une étude des impacts de la variabilité pluviométrique sur le régime hydrologique a permis de savoir que cette dernière contribue à la baisse de l'écoulement. Selon Vissin (2007) les déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 ont amplifié la baisse des écoulements dans toutes les rivières (Mékrou, Alibori, Sota) du bassin béninois du fleuve Niger. Les baisses de l'écoulement sont cinq (05) ou six (06) fois plus sévère que celle de la pluie. Les résultats obtenus par Ogouwalé (2013) indiquent également que la période 1971-2010 a été marquée par une dynamique climatique avec près de 17 %

d'années déficitaires et une hausse des températures moyennes de 1,8 °C. Dans le même temps, les conditions environnementales se sont dégradées. Les unités d'affectation des terres montrent qu'entre 1978 et 2007, les mosaïques de culture ont progressé d'environ 29,5 %. Au cours de la même période, la forêt dense, les forêts arborées et arbustives baissent respectivement de 7,60 % et 14,30 % (Vissin, 2007). Selon le scénario A1B et B1 du modèle Régional REMO à l'horizon 2050, en référence à la période 1971-2000, l'élévation de la température moyenne serait de 2,4 à 3,5 °C et la diminution des pluies en moyenne de 43 % avec une variation spatiale de -18 à -37 % selon les résultats des scénarios A1B et B1 du modèle Régional REMO (Ogouwalé, 2013). A l'échelle mensuelle, les mois de janvier et novembre augmenteront d'environ 61 % et 70 % selon le scénario A1B et 42 % et 19 % selon le scénario B1 en rapport à la référence 1971-2000. Tous les scénarios montrent des suppléments de hauteur de pluies à l'horizon 2050, qui seront de l'ordre de 60 à 70 % pour le scénario A1B de 20 à 41 % pour le scénario B1 (Ogouwalé, 2013).

Le versant de la rivière Zou est soumis à une fluctuation de ses paramètres climatiques sur la période de 1965 à 2010, Atchadé (2014). Cette dernière influence l'écoulement sur l'ensemble du bassin mais avec un effet plus important dans le sous-bassin de Atchérigbé. Par ailleurs, à moyen terme c'est-à-dire à l'horizon 2030 la variabilité climatique et la dégradation du couvert végétal entraîneront une baisse des ressources en eau de surface d'environ 33,87 % et celle des ressources en eau souterraine d'environ 31,07 %. La production en eau du bassin baissera d'environ 38,25 %.

Ces différents auteurs ont montré une tendance à la baisse dans les séries pluviométriques ouest-africaines à partir des années 1970.

- **Structure spatiale et l'analyse de la tendance des jours et hauteurs de pluies dans le bas-Bénin**

Les travaux de Vissin (1998) ont montré que les chroniques de la pluviométrie au nord-ouest du Bénin ont connu une rupture de stationnarité en 1972, avec une diminution progressive des hauteurs annuelles de pluies du sud vers le nord, ce qui est en accord avec les valeurs moyennes de la pluviométrie annuelle 1971 à 2010. Vissin (1998) dans son travail a également remarqué que les changements pluviométriques se sont largement amplifiés avec des déficits les plus marqués qui s'observent au cours de la saison des pluies.

La variabilité spatio-temporelle connaît une alternance d'années déficitaires et excédentaires de pluie avec un faible taux du nombre de jours de pluies et la persistance de la sécheresse, Aimadé

(2013). Cette variabilité pluviométrique relativement forte impose les contraintes d'ordre climatique les plus remarquables, sur la disponibilité hydrique. Les précipitations ont une structure variée, en général se renforcent progressivement de l'Ouest à l'Est ; ce qui montre l'existence d'un léger gradient Est-Ouest.

Des résultats similaires ont été obtenus au Bénin par les travaux réalisés par Houndénou et al (1998) qui ont fait une analyse des pluies dans la région 14 de l'Atacora au nord-ouest du Bénin ; cette analyse confirme l'existence d'une péjoration climatique sur la période 1960- 1990. Cette péjoration se caractérise par une diminution remarquable des abats pluvieux, une réduction considérable du nombre de jours de pluie, un début tardif et une fin précoce de la saison pluvieuse.

Le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi a été marqué par une baisse des cumuls pluviométriques de 20 % sur la période 1960 à 2010, Koumassi, (2015).

De leur côté, Houndénou et al. (2002) mettent en évidence une forte instabilité et une réduction de la saison humide sur le bassin béninois. Ils ont montré aussi que les séries pluviométriques de ce bassin connaissent une baisse marquée sur la période 1960-1990 avec une recrudescence de « pluies tardives ».

Par ailleurs malgré un retour à un rythme de pluviométrie plus proche de la normale à la fin des décennies 1990, les écoulements de surface ne paraissent pas suivre la même tendance aussi bien en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique centrale (Olivry et al.,1993).

Les résultats de recherches de ses auteurs ont permis dans l'ensemble de cerner d'avantage les concepts clés du sujet de recherche. Ils ont permis aussi d'approfondir d'une part les connaissances sur l'évaluation de la variabilité climatique et l'influence de cette variabilité sur les ressources en eau. D'autre part, la démarche méthodologique utilisée par ces auteurs et les résultats obtenus à l'issue de leurs travaux, ont orienté le choix des données et la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude. Cependant ses différents auteurs n'ont pas mis l'accent sur la gestion et l'usage faite des ressources en eau pour faire face aux problèmes de la variabilité spatio-temporelle des pluies d'où l'importance de cette étude.

- **Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)**

La GIRE est « un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées en vue de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social qui en résulte, sans compromettre la durabilité d'écosystèmes

vitaux ». Au début des années 2000, la plupart des pays africains ont commencé à intégrer l'approche GIRE dans leurs politiques de gestion de l'eau (GWP, RIOB, et R.I. des organismes de bassin 2009). En effet le Bénin a marqué sa volonté de mise en œuvre de la GIRE par l'adoption du document de « politiques et stratégie en matière d'eau » en 2009 et s'inscrit dans une perspective de développement durable suivie de l'approche qui consiste à prendre en considération et à concilier les différentes utilisations et fonctions physiologique socioculturelles, économiques, environnementales de l'eau, ainsi que ses éventuels effets négatifs sur les personnes, les biens ou l'environnement (laboratoire Amen, 2012). De plus depuis l'adoption de la GIRE comme approche de développement des ressources en eau en 1998 au Bénin, L'arsenal institutionnel se caractérise par l'existence d'un grand nombre d'acteurs qui interviennent directement, ou indirectement sur différents aspects de gestion et d'utilisation de la ressource en eau. L'arsenal juridique disponible est important et diversifié et se rapporte à la protection et à la sauvegarde des ressources naturelles y compris des ressources en eau (Ministère de l'Eau, 2015).

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

Dans le département du Mono, l'accès à l'eau potable pose encore d'énormes difficultés. Cependant environ 70% de la population n'a pas accès à l'eau potable et doit recourir à des puits, les rivières et les lacs pour leurs besoins (Agence française pour le développement, 2015). De plus on note plusieurs problèmes liés à la connaissance et aux usages des ressources en eau dans le département. Il s'agit de la dégradation de la qualité et le manque de suivi des ressources en eau, la non maîtrise de la quantité d'eau entrant dans le bassin, ainsi que les risques sanitaires. Selon Charnay (2010), l'eau en tant que bien commun est confiée à un ensemble d'acteurs (privés et publics) dans le but de répondre aux besoins du territoire, tout en assurant le renouvellement et la durabilité des ressources. Pour que l'eau devienne une ressource exploitable, cela suppose la construction d'une structure intégrant à la fois les prélèvements, le stockage et le transport, adaptée à la quantité d'eau disponibles, à la demande et l'offre. La gestion doit être adaptée aux différents types de ressources exploitables (souterraines, surface ou sous forme de stock), tenir compte des interactions entre ces ressources et répondre aux attentes.

Pour soutenir le cadre juridique, la Politique Nationale de l'Eau avec ses réformes propose (04) quatre orientations prioritaires pour une gestion efficiente et durable des ressources en eau et se décline comme : (i) la reformulation du cadre de gestion en recherchant la bonne gouvernance de l'eau ; assurance à (ii) l' accès équitable et durable à l'eau potable et à l'assainissement pour les populations urbaines et rurales ; (iii) garantir la disponibilité de l'eau, en quantité et en qualité, pour l'ensemble des activités économiques ; (iv) assurer la santé, la sécurité publique et la conservation des écosystèmes aquatiques (Cocker, 2020).

Ces instruments juridiques ont été régulièrement renforcés, plusieurs lois et décrets ont été adoptés ou sont en cours d'élaboration ou d'adoption (Ministère de l'Eau, 2015). Force est de constater que certains de ces documents en cours d'élaboration ou d'adoption sont finalement entrés en vigueur mais sans satisfaction.

3. But de la recherche

Cette recherche a pour but de connaître l'influence de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau dans la basse vallée du mono et de proposer des méthodes pour une meilleure exploitation de cette ressource.

4. Problématique et question de recherche

Au vu de l'introduction et du cadre de l'étude, il convient de poser les questions suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques de la variabilité des hauteurs des pluies ?
- Quels sont les impacts de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau et aux populations du mono ?
- Quels sont les besoins (actuels et futur) en eau de la population ?

Pour répondre à ces questions, des objectifs ont été fixés.

5. Objectif du mémoire

5.1. Objectif général

L'objectifs général de cette étude est d'analysé la variabilité pluviométrique et de déduire ses impacts sur les ressources en eau et aux populations du mono.

5.2. Objectifs spécifiques

De façon spécifique, il s'agit de :

-  Analyser la variabilité des hauteurs de pluies dans le bassin du Mono ;
-  Evaluer la performance du modèle WEAP pour une planification des ressources en eau ;
-  Modéliser l'allocation et les besoins en eau de la population de Comè et Grand-Popo ;

6. Hypothèses de travail

Plusieurs hypothèses sous-tendent cette recherche :

- La variabilité climatique entraîne une baisse des précipitations et un déficit d'écoulement ;
- La demande en eau de la population accroît tandis que la ressource en eau diminue ;
- L'allocation et les besoins en eau aux populations de Comè et Grand-Popo sont effectifs ;

7. Résultats attendus de l'étude et cibles

La présente étude nous permettra de caractériser la variabilité pluviométrique et de déduire l'impact de cette variabilité sur les ressources en eau et les populations du Mono.

8. Grande division du mémoire

Pour atteindre les objectifs escomptés, l'étude a été structurée en deux (02) chapitres. Le premier chapitre intitulé « données, matériels et méthodes » s'intéressera à la présentation du milieu d'étude, la description des données et matériels (logiciels) utilisés et de la méthodologie adoptée. Le deuxième chapitre présentera les résultats et discussion.

CHAPITRE 1 : DONNEES, MATERIELS ET METHODES

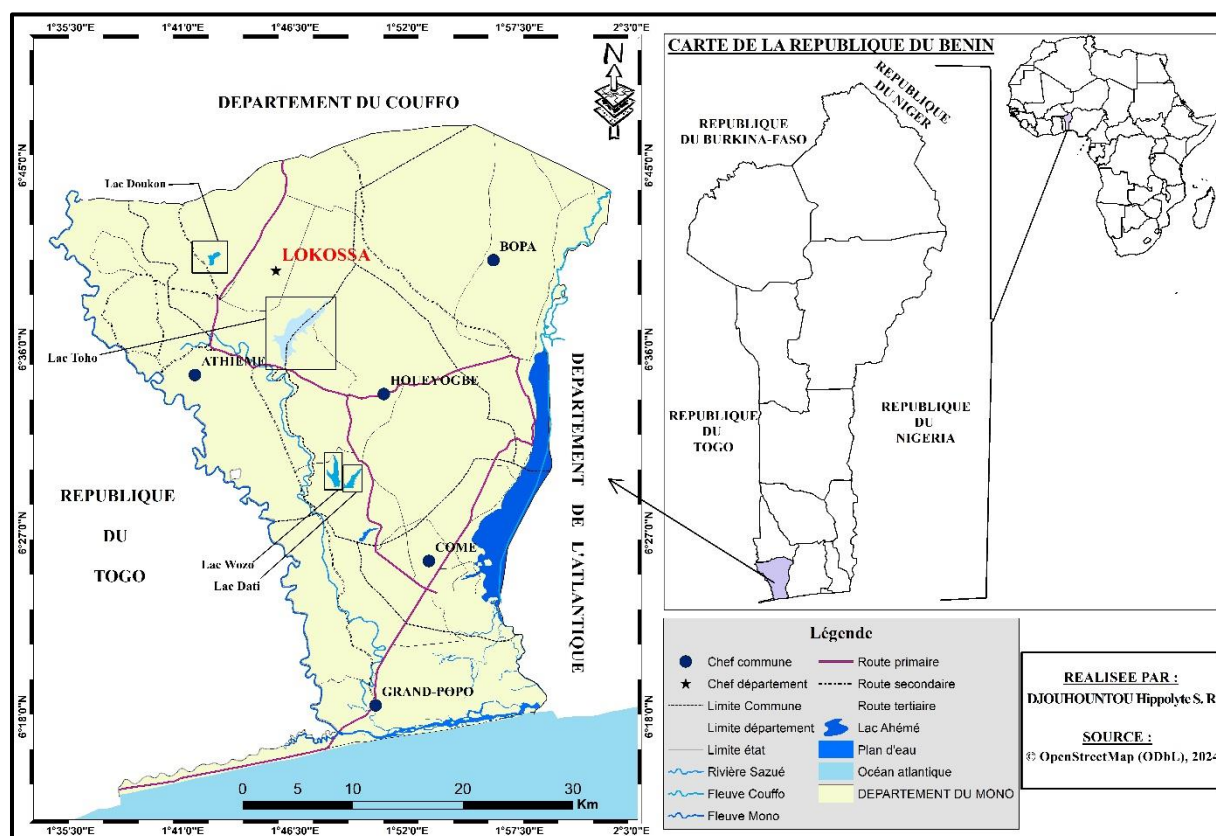
1.1 Introduction

Le chapitre 1 de notre travail présente le milieu d'étude, les données et matériels utilisés, et décrit par la suite la méthodologie utilisée pour caractériser la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau ainsi que son allocation aux populations du Mono.

1.2. Milieu d'étude

1.2.1. Localisation

Situé au sud-ouest de la République du Bénin, le département du Mono couvre une superficie de 1 605 km². Six communes composent ce département. Il s'agit de : Athiémé, Bopa, Comè, Grand-Popo, Houéyogbé et Lokossa. On y dénombre 276 villages regroupés en 35 Arrondissements, il se trouve entre 6°25' et 7°75 latitude Nord et 1°03' et 2°25' longitude Est. Lokossa est le Chef-Lieu de département, il est limité au Nord par le département du Couffo, au Sud par l'Océan Atlantique, à l'Est par le département de l'Atlantique et à l'Ouest par la République du Togo.



1.2.2. Géomorphologie et géologie

La zone d'étude localisée au Sud-Ouest du Bénin s'étend en partie sur le socle cristallin et le bassin sédimentaire côtier. En effet, au niveau du département du Mono on observe que les formations du Bassin Sédimentaire Côtier (Lagnika, 2004).

Dans cette zone on rencontre le socle cristallin granito-gneissique affleurant surtout jusqu'à la latitude d'Aplahoué à Lanta et qui s'enfonce sous le Bassin sédimentaire Côtier dont l'épaisseur atteint plus de 2000 m de profondeur vers la côte. Du point de vue stratigraphique, le Bassin sédimentaire Côtier de la zone d'étude est constitué des formations d'âge crétacé au Quaternaire Récent (Lagnika, 2004) :

- Le quaternaire constitué de dépôts alluvionnaires récents comme anciens, dépôts tidaux, lagunaires, deltaïques et de cordon du littoral.
- Le Tertiaire - Crétacé avec plusieurs unités constituées de gravier, de sable ou sable quartzeux, d'argiles parfois kaoliniques, marneuses ou feuilletées, de grès ferrugineux subordonnés, de calcaire, de marnes et de dépôts côtiers.
- Le Cambrien - Protérozoïque avec des séries volcano-sédimentaires (la série de LANTA), les Granitoïdes (les Monzodiorites) et enfin les Filons soit basiques, acides ou intermédiaires.
- Le Protérozoïque Indifférencié avec des complexes métamorphiques : le Gneiss migmatitique à amphibole et à biotite ; quartzeux et alcalin à pyroxène ; le Marbre ; les Quartzites ; les Charnokites grano- monzodioritiques et les Blastomylonites et mylonites liées à l'accident de Kandi.
- Le Turonien-Coniacien et le maestrichien s'enfoncent dans le département du Mono avec le socle.
- Les dépressions notamment celle de la Lama dont fait partie la zone agro écologique de la dépression de Tchi sont constituées d'alternances de sédiments argileux, marneux, et localement calcaire d'âge Eocène-Paléocène.
- Vient ensuite le Miocène-Pliocène sous forme de collines argilo-gréso-sableuses qui affleurent au niveau du plateau de Comè et de la dorsale de Dogbo-Tota à Houin qui prolonge le plateau "Adja" vers le Sud du Mono.
- Enfin, on rencontre les sédiments d'âge quaternaire sous forme de terrasses argilo-marneuses en bordure des plateaux (surtout la zone des lacs) et des plaines alluviales bordières

du Mono, zones régulièrement soumises aux phénomènes de l'inondation. Et le long de la côte se trouvent les sables marins littoraux.

1.2.3. Hydrologie

L'hydrologie du département du Mono est caractérisée par la présence de plusieurs cours d'eau importants tels que le fleuve Mono, le lac Ahémé et ses affluents, le lac Nokoué et ses affluents, ainsi que de nombreux cours d'eau saisonniers. Selon Lagnika (2004), le département du Mono est situé dans le sud-ouest du Bénin et connaît une grande variabilité climatique avec des précipitations annuelles qui peuvent atteindre 1500 mm en moyenne. Ces précipitations sont réparties de manière irrégulière tout au long de l'année, ce qui entraîne des inondations et des sécheresses récurrentes. Le département du Mono est également vulnérable aux risques d'inondations et de sécheresses à cause de son relief et de sa situation géographique (Lagnika, 2004).

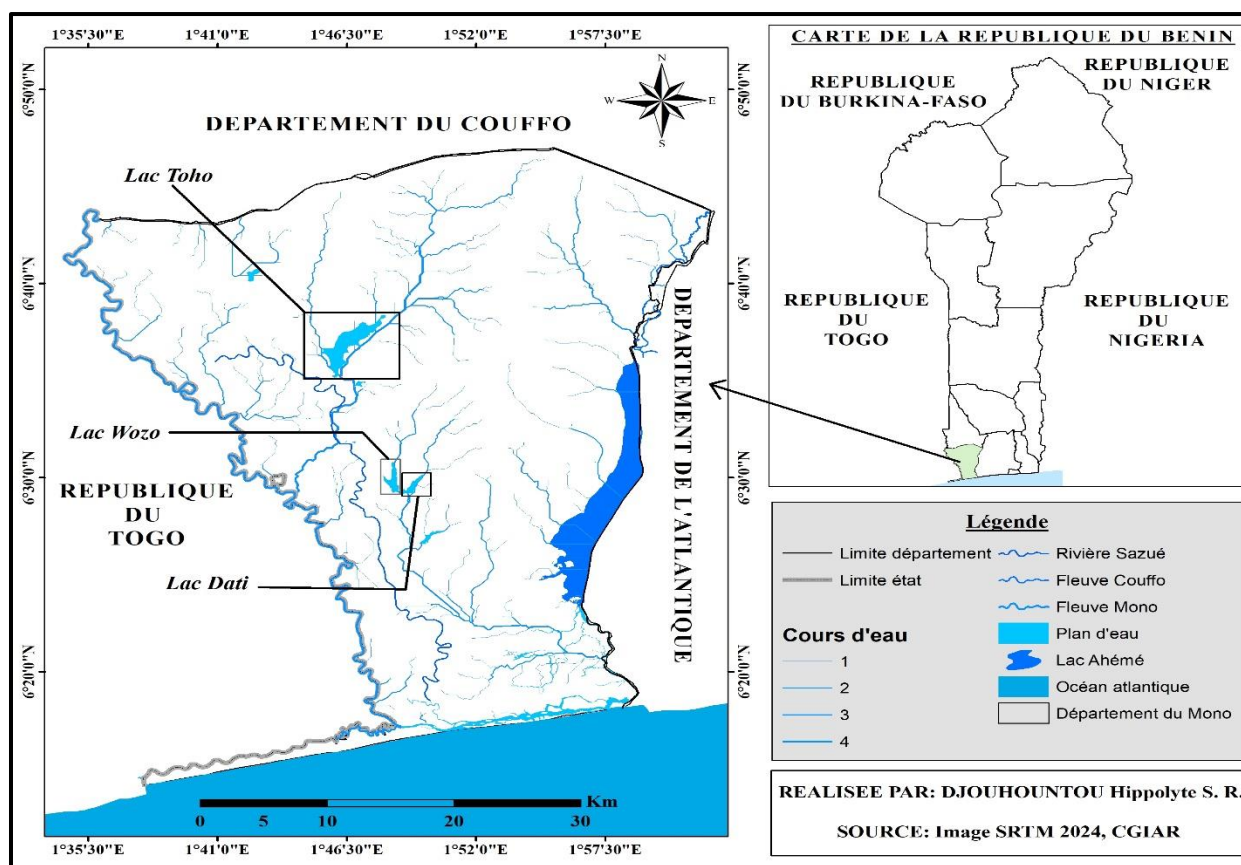


Figure 2: Carte du réseau hydrographique du département du Mono

1.2.4. Sols, végétation, climat et hydrographie

Dans le département du Mono, on distingue cinq (05) types de sols qui sont déterminants pour les exploitations agricoles et la végétation. Il s'agit des (i) sols ferrugineux tropicaux de texture limono-sableuse et d'aptitude culturale limitée ; (ii) des terres de barre des plateaux dont les caractéristiques physico-chimiques en font des zones de prédilection pour les cultures vivrières ; (iii) des vertisols de la dépression des Tchi communément appelés terres noires assez difficiles à mettre en culture en dépit de leur fertilité à cause de leur texture argileuse lourde et peu perméable à l'eau ; (iv) des sols alluviaux et colluviaux des vallées du fleuve Mono, très riches, de temps en temps exposés aux flux et aux dé-flux du fleuve, terrains de prédilection des cultures maraîchères ; (v) des sols sablonneux du cordon littoral peu fertiles, propices aux plantations de cocotiers.

En général, la végétation dominante est la forêt arbustive dense et la palmeraie vignoble. Il existe une forêt classée à Houéyogbé et des forêts galeries le long des cours d'eau et des forêts claires avec quelques preuves de la dégradation de la forêt naturelle(<http://www.instad.bj>).

Le climat du département du Mono est de type subéquatorial. Il est caractérisé par une alternance annuelle de saisons sèches et de saisons pluvieuses. Les niveaux annuels moyens de précipitations varient entre 1.160 mm au Nord et 850 mm au Sud (<http://www.instad.bj>). On distingue dans le département du Mono, les régions de plateaux, les moyennes et les basses vallées, la grande dépression des Tchi qui n'est rien d'autre que le prolongement de celle de la Lama, la zone littorale avec la mer, les deltas, les lagunes, les lacs, les marécages et les cordons littoraux, le réseau hydrographique est formé par le fleuve Mono ainsi que ses affluents et défluent, la lagune de Grand-Popo, les lacs Toho et Ahémé et la rivière Aho.

Il existe un réseau hydrographique dégradé et complexe dans le département du Mono, avec la présence de mares et de lacs à sa périphérie (lacs de Togbadji et Toho). Seule, la Sazué (63 km) est bien marquée. Elle est formée par la réunion de deux affluents : la Dvédo (22 km) et la Savédo (40 km). Il est caractérisé par un réseau de chenaux longitudinaux et latéraux bien limités par des bourrelets de berges. Les lits ont une profondeur comprise entre 5 et 7m³. On observe également dans la vallée, une multitude de terrasses fluviales et fluvio-marines, ainsi que des dépressions lacustres (www.eau-mines.Gouv.bj).

1.2.5. Quelques aspects socio-économiques

Les activités principales sont l'agriculture, la pêche, l'élevage, la transformation des produits agricoles, l'artisanat et le commerce. On y pratique aussi du petit élevage, une intense activité

de commercialisation des produits agricoles, des activités artisanales de transformation des produits agricoles. L'agriculture rencontre un certain nombre de problèmes. Très peu de ménages agricoles utilisent l'engrais pour la production agricole alors qu'une très grande partie des sols sont pauvres. Aussi l'utilisation des semences améliorées et produits phytosanitaires est encore timide chez les populations. L'industrialisation semble peu importante, on dénombre une huilerie à Houin-Agamè ; une usine d'eau minérale Possotomè ; et une usine de textile à Lokossa.

Le Mono dispose de quelques atouts touristiques, notamment la plage de Grand-Popo et le site de Possotomè. Le département du Mono a une population totale de 360 037 habitants dont 174 977 hommes contre 185060 femmes. On compte 94,6 hommes pour 100 femme (<http://www.instad.bj>).

La densité du département est de 224,3 habitants au km² ; elle varie aussi à l'intérieur du département (entre les communes) de 140 habitants au km² (Grand-Popo), à 358 habitants au km² (Comè).

En dehors des minorités Guen ou Mina venues du Ghana qui se sont installées dans les régions d'Agoué et de Grand-Popo, on retrouve en majorité les Sahouè (39,9%), les Kotafon ou Tchi (21,3%). Les Ouatchi et Adja sont aussi présents dans le département pour respectivement (8,2%) et (8,0%) .

La religion dominante est le vodoun (40,5%), on note aussi dans le département les catholiques (20,4%) et autres religions traditionnelles (13,8%). Le Mono a un taux d'urbanisation de 37,9% inférieur à la moyenne nationale qui est de 39 % (Gbèyétin, 2014).

1.3. Données utilisées

Pour atteindre les objectifs cités plus haut, nous avons adopté une méthodologie axée sur la recherche documentaire et la collecte des données.

En effet, la recherche documentaire est nécessaire pour connaître ce qui est fait et collecter d'importantes informations qui ont servi d'appui aux choix et à l'application des méthodes et techniques utilisées dans cette étude.

1.3.1. Données climatiques

Les données climatiques concernent les hauteurs de pluie, les températures (minimales et maximales), le vent, l'humidité, l'évapotranspiration potentielle à l'échelle journalière de

l'Agence Nationale de la Météorologie (Météo-Bénin) sur une période de 1991-2022 aux stations de Bopa, Grand popo et Ouidah.

1.3.2. Données hydrométriques

Il s'agit des débits journaliers observés à l'échelle de la station d'Athiémé. Ces données ont été obtenues de la base des données de la Direction Générale de l'Eau (DG-eau) à Cotonou sur une période de 1991 à 2022.

1.3.3. Données de l'approvisionnement en eau potable (AEP)

Il s'agit des données relatives à l'eau brute pompée à partir des forages vers la station de traitement de Comè. Ces données sont recueillies à la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB). Elles sont au pas de temps journalier et couvrent la période de 2015 à 2020.

Les données concernant le volume d'eau distribué aux populations de Comè et Grand popo de 2015 à 2020 sont regroupées dans le tableau 1 :

Tableau 1: Volume d'eau distribué à la population

Localités\Année	2015	2016	2017	2018	2020
COME	137820	222832.5	192457.5	221047.5	480866.25
GRAND POPO	45940	74277.5	64152.5	73682.5	162288.75

1.3.4. Données caractéristiques de l'aquifère

Le Mono fait partie du bassin sédimentaire côtier, la capacité de stockage maximal de l'aquifère est estimée à 600 millions m³ (Rapport du Benin, Vision Nationale de l'eau, 2025). En effet, cette donnée est utilisée comme donnée d'entrée dans WEAP et correspondent à la recharge maximale des nappes situées au niveau des forages.

1.3.5. Données démographiques

Les données démographiques renseignent sur la taille des populations de Come et Grand-Popo ainsi que leurs taux d'accroissement. Elles proviennent de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE, 2013). Le recensement de 1992 estimait la population de Comè et Grand popo respectivement à 43.255 et 26.337 habitants. En 2002, elle est passée à 57. 672 et 39 250 habitants avec un taux de croissance annuel de 2,50 % et 3,29 %. En 2013, elle a été estimée à 79. 989 et 57. 636 habitants avec un taux de croissance de 2,79 % et 3,19 % (INSAE, 2013).

1.4. Matériels utilisés

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

- Word office 2009 pour le traitement de texte ;
- Excel office 2019 (marque déposée de Microsoft Corporation) qui est un tableur intégrant graphique, tableau et base de données, cet outil nous a permis de réorganiser les données et de faire les calculs statistiques ;
- R-Studio 4.3.1, un environnement de développement intégré (IDE) utilisée pour la programmation en langage R. Cet outil nous a permis d'appliquer les calculs statistiques et de 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 et l'exploitation des ressources en eau ;
- CropWat et Climwat pour le calcul de l'Evapotranspiration de référence ETo ;

• Description du logiciel WEAP

Le modèle « Water Évaluation And Planning System (WEAP) » est un outil de planification et de gestion de l'eau développé par l'Institut de l'Environnement de Stockholm (SEI). Il a été l'outil de base pour la modélisation du devenir des ressources en eau et la demande en eau en prenant en compte le changement climatique et la pression humaine. Il utilise les données hydro climatiques pour prévoir les variations des ressources en eau en termes de quantité, de qualité et de besoins pour les différents usages. Il permet également l'élaboration et l'analyse des scénarios (changement climatique, forte démographie, accroissement des superficies cultivées, etc.) pour aider à la prise de décision sur la formulation et la mise en œuvre des mécanismes plus efficaces de fourniture de l'eau à tous les usagers. WEAP est téléchargeable à l'adresse www.weap21.org. (Nana, 2023).

• Description du logiciel CropWat et Climwat

L'Evapotranspiration référence a été calculé à partir de l'outil CropWat qui est un outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion de l'irrigation. Il a été développé par la division Land and Water Développement (LWD) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation

et l'agriculture « Food and Agriculture Organisation of the United Nations » (FAO). Il permet les calculs standards d'évapotranspiration de référence, des besoins en eau des plantes et plus spécifiquement, pour la gestion des schémas d'irrigation. Le logiciel intègre des données sur les coefficients culturaux, le nombre de jours des différents stades végétatifs, les profondeurs racinaires et des outils assez simples pour l'estimation des besoins en eau. Les étapes de calcul de l'ETo avec CropWat se présentent comme suit :

a) Collecte, analyse et homogénéisation des données utilisées par le logiciel :

- Températures moyennes mensuelles minimales et maximales (°C)
- Précipitations moyennes mensuelles (mm)
- Humidité relative moyenne mensuelle (%)
- Vitesse de vent moyenne mensuelle (m/s)
- Durée d'insolation moyenne mensuelle (heures/jour)

b) Saisie des données climatiques dans le logiciel ou renseigner dans le cas où aucun des données d'entrée ne sont disponible, les coordonnées géographiques de la zone d'étude dans Climwat pour extraire les 5 variables climatiques.

c) Calcul automatique par Cropwat de :

- ETo (évapotranspiration de référence),

1.5. Méthodes

1.5.1. Collecte des données

Elle intègre d'abord la recherche des documents scientifiques et spécifiques ayant permis de mieux cerner les aspects du sujet. Ensuite, nous avons la collecte des données hydroclimatiques, des données relatives à l'approvisionnement en eau potable, des données démographiques et cartographiques. Ces données proviennent des enquêtes sur le terrain et des structures de collecte (Météo-Benin, DG-eau, Soneb, Insee) ...etc

1.5.2. 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. Plusieurs moyens permettent d'estimer, à un moment donné, la valeur probable d'un paramètre qui n'a pas été observé. Dans le cadre de cette étude, la méthode choisie pour l'interpolation spatiale de la pluviométrie sur le bassin est la méthode

de Krigeage. Alors, les données pluviométriques ont été minutieusement traitées (élimination des années avec beaucoup de lacune) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes.

1.5.3. Méthodes de traitement des données

1.5.3.1 Caractérisation de la variabilité pluviométrique

La mise en évidence de la variabilité pluviométrique par le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 et l'indice de NICHOLSON permet à travers l'exploitation des données pluviométriques obtenues pour une longue série de mesures, allant de 1991 à 2022, de mettre en évidence les tendances pluviométriques 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) :

$$SPl_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma(X)}$$

SPl_i : Indice pluviométrique (1)

X_i : Hauteur de pluie en mm pour une année i

$\bar{X}$: Moyenne annuelle de pluie en mm sur la période d'étude

$\sigma(X)$: Écart-type de la pluviométrie sur la période d'étude

L'indice de Nicholson est une méthode qui permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométriques de la région. C'est-à-dire de différencier les périodes sèches des périodes humides comme il est indiqué dans le tableau 2.

Tableau 2: Nomenclature de l'indice de Nicholson

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

✓ **Filtre passe bas de HANNING d'ordre 2**

Le Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, appelée aussi moyenne mobile pondérée, 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 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) à (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. Il comporte plusieurs tests de détection de rupture parmi lesquels nous aurons à utiliser :

✓ **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)**

Cette méthode 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 :

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

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 pluviométriques 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 :

$$D = \left(\frac{\sum X_j}{\sum X_i} \right) - 1 \quad (8)$$

Où $\sum X_j$ représente la moyenne sur la période après la rupture et $\sum X_i$ la moyenne sur la période avant la rupture.

1.5.3.2 Modélisation de l'allocation et de la gestion de la ressource en eau

▪ **Demande en eau**

Dans la commune de Comè l'eau de la nappe (forages) est prélevée pour l'approvisionnement en eau potable de la population.

▪ **Estimation des besoins**

L'eau du sous-sol étant utilisée principalement pour l'approvisionnement en eau potable il est donc nécessaire de faire une estimation pour des besoins d'usages. Cette estimation est donnée par la formule ci-dessous :

$$BE = pop_act \times norme\ de\ consommation \times nombre\ de\ jours$$

Avec *pop_act* : la population actualisée donnée par la formule

$$pop_{act} = P_o \times (1 + \alpha)^n$$

P_o : Population à l'année de référence

n : Nombre d'années

α : Taux d'accroissement de la population

Considérant la production annuelle et la population de par l'INSAE, un taux d'accroissement τ (%) annuel du nombre d'abonnés a été calculé suivant la formule :

$$\tau(\%) = \left(\sqrt[n]{\frac{\text{Valeur finale}}{\text{Valeur initiale}}} - 1 \right) \times 100, \quad (9)$$

Valeur finale = population finale ;

Valeur initiale = population initiale ;

n = Nombre d'années ;

- Hypothèses clés

Tableau 3: Paramètres de base pour la modélisation des besoins en eau de la population

Ville/Année (2016)	Nbr de ménage (hbt)	Taux d'accroissement (%)	Population consommant l'eau (hbt)	Taux de consommation annuelle (m ³)
Comè	18862	4,2	23577	31,11
Grand-Popo	14054	4,1	17567	11,43

▪ Calcule de l'évapotranspiration référence ET_o

L'évapotranspiration de référence ET_o , a été calculée à partir de CLIMWAT 2.0 for CROPWAT V2.0(SEI, 2008) selon l'équation suivante (Penman Monteith, 1956) :

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (10)$$

Avec ;

ET_o : Evapotranspiration de référence ou évapotranspiration potentielle (mm/j)

R_n : Rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m²/j)

G : Flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m²/j)

T : Température journalière à 2m d'altitude (°C)

U_2 : Vitesse du vent à 2m d'altitude (m/s)

e_s : Pression de la vapeur à saturation (kPa)

e_a : Pression réelle de la vapeur (kPa)

$e_s - e_a$: Déficit de la pression de vapeur à saturation (kPa)

Δ : Pente de la courbe des pressions de vapeur (kPa/°C)

γ : Constante psychrométrique (kPa/°C)

▪ Calage et validation du modèle WEAP

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

- **Modèle pluie ruissellement de la FAO** : Ce modèle est développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il s'agit d'un modèle de pluie_ruissellement distribué qui simule la pluie, l'infiltration et l'écoulement sur un bassin versant.
- **Simulation d'interaction eau de surface eau souterrain** : Cette méthode de simulation est développée pour simuler les processus hydrologiques complexes au sein d'un bassin versant. Elle prend en compte les interactions entre l'eau de surface et l'eau souterraine, y compris les flux de ruissellement, l'infiltration et l'écoulement souterrain.
- **La méthode MABIA** : Elle est développée pour modéliser les processus hydrologiques et hydrauliques au sein d'un bassin versant. Cette méthode de simulation de bassin versant prend en compte les interactions entre les cours d'eau, les réservoirs et les zones inondables.

- La méthode de la croissance des plantes : Cette méthode est développée pour modéliser la croissance et le développement des plantes sur un territoire donné. Elle prend en compte les facteurs tels que la température, la pluviométrie, le sol, la lumière et la disponibilité en eau.
- Modèle de l'humidité du sol : Ce modèle est développé pour modéliser les processus de dégradation des sols liés à l'activité humaine. Il prend en compte les facteurs tels que l'érosion, la déforestation, le drainage des sols, la présence de pollutions et la gestion des terres agricoles.

Dans cette étude, les données disponibles nous ont permis d'utiliser la méthode du modèle pluie_ruissellement de la FAO.

Il y a deux étapes dans la simulation d'un modèle : la première appelée calage et la seconde appelée validation. Lors du calage (1991 à 2000), on fait varier les paramètres du modèle et l'on utilise des critères statistiques de performance pour quantifier l'écart entre les débits simulés et observés et ainsi apprécier la qualité de simulation du modèle. Lors de la validation (2000 à 2022) on simule les débits sur une période différente de celle utilisée pour le calage en utilisant le jeu de paramètres donnant le critère optimal trouvé lors de l'étape de calage. Les débits simulés lors de la validation sont alors comparés à l'observation à l'aide des critères d'évaluation. Les critères statistiques calculés donnent une estimation des performances du modèle. Ces critères utilisés dans l'étude sont entre autres le critère de Nash-Sutcliffe (NSE), le pourcentage de biais noté (PBIAIS) (Dawson et al, 2007), l'erreur quadratique moyenne (NRMSE).

▪ 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 scénarios 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 « current accounts » 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 scénarios 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 l'irrégularité des précipitations pour les années à venir. Ainsi, la projection de ces paramètres est effectuée à l'aide des 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 puisque que nous ne disposons pas les données climatiques future et ceci sur une période de 100 ans minimum. Nous pouvons seulement agir sur la variation annuelle de chaque paramètre climatique qui influe sur les ressources en eau du bassin 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, les différents cours d'eau qui traversent la zone d'étude. Nous avons ensuite, introduire deux sites de demande domestique,

les villes de Comè et de Grand-Popo qui sont approvisionnés par un forage local. Ses sites sont matérialisés par un point rouge. Quant au forage, il est matérialisé par un carré de couleur verte. Les sites de demande sont reliés au forage 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 priorité, exprimé 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, on suppose que tous les sites de demandes ont la même priorité de satisfaction en eau égale à 1 (figure 3).

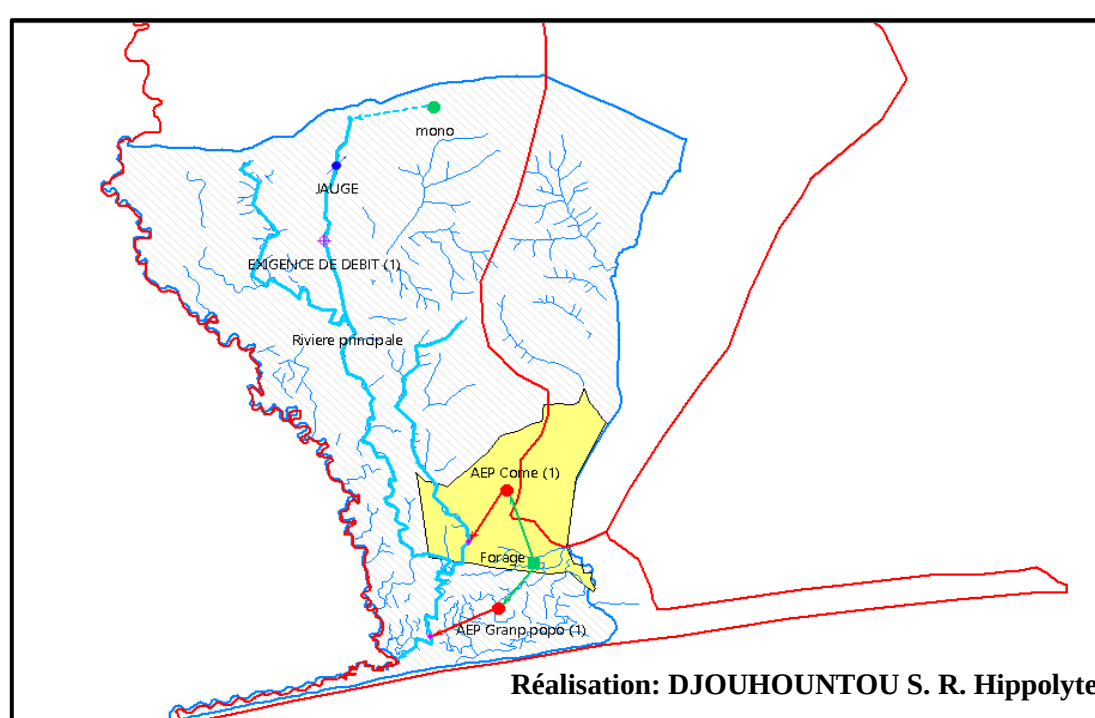


Figure 3: Schéma conceptuel de modélisationn par WEAP du département du Mono

▪ Création des scenarios

Le modèle WEAP 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 de la ville de Comè et Granp popo. A cet effet, une année de « compte courant » a été choisie pour servir d'année de base au modèle (état actuel) en 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 scenario de reference**

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.

Dans cette étude, deux scénarios, l'augmentation du taux d'accroissement (4,5 %) et du nombre d'abonnés (6%) par rapport à la période de référence ont été créés pour évaluer le niveau de satisfaction des besoins en eau à l'horizon 2050.

1.6. Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous retiendrons que, pour une bonne gestion des ressources en eau de la ville de Comè, plusieurs données (climatiques, hydrologiques, et démographiques) et méthodes ont été utilisées. En effet les méthodes statistiques et le calcul des indices ont permis de caractériser la variabilité pluviométrique sur la zone d'étude. 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 : RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Introduction

Depuis le début des années 1970, 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 (Alamou et al. 2016). Dans le cas de notre étude, nous présentons d'une part, l'évolution des variables pluviométriques des stations de Ouidah, Grand-Popo et Bopa au fil des années ainsi que les fluctuations temporelles pour mieux appréhender les schémas et les tendances de variabilité d'autre part, nous analysons les impacts de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau et son allocation aux populations du département de Mono. Cette analyse permettra de mieux comprendre les caractéristiques climatiques et de fournir des informations fiables pour la planification et la gestion des ressources en eau dans la zone d'étude.

2.2 Variabilité climatiques

2.2.1. Variabilité intermensuelle des précipitations

- **Station de Grand-Popo**

La figure 4 ci-dessous montre la pluviométrie intermensuelle des stations de Grand-Popo, Ouidah et Bopa. A l'analyse de cette figure, on constate que, la série annuelle des précipitations au niveau de la station de Grand-Popo présente une diminution progressive de pluie de 1991 à 2000 puis une reprise des précipitations de 2001 à 2009. Ensuite de 2010 à 2019, on note une diminution de la pluie et une reprise progressive des précipitations de 2020 à 2022. La moyenne intermensuelle des précipitations sur les 30 années d'observations est de 77,53 mm ; avec comme valeurs extrêmes minimale 11,68 mm en 2012 et maximale 136,95 mm en 2004 (figure 4).

- **Station de Ouidah**

A la station de Ouidah, on constate une diminution progressive de pluie de 1991 à 2000 puis une reprise des précipitations de 2001 à 2009, ensuite de 2010 à 2015 on note une diminution de la pluie et une reprise progressive des précipitations de 2016 à 2022. La moyenne intermensuelle des précipitations sur cette station est de 88,81 mm ; avec comme valeurs extrêmes minimale 20,93 mm en 2015 et maximale 137,71 mm en 2010 (figure 4)

- **Station de Bopa**

Au niveau de la station de Bopa, on constate une forte variation de pluie de 1991 à 2009 avec une intensité maximale de 110 mm et 65 mm minimal, puis une diminution progressive des précipitations de 2010 à 2019. Ensuite, on note une reprise progressive des précipitations de 2020 à 2022. Elle présente une moyenne intermensuelle des précipitations de 80,43 mm ; avec comme valeurs extrêmes minimale 55,91 mm en 1998 et maximale 110,33 mm en 2010 (figure 4)

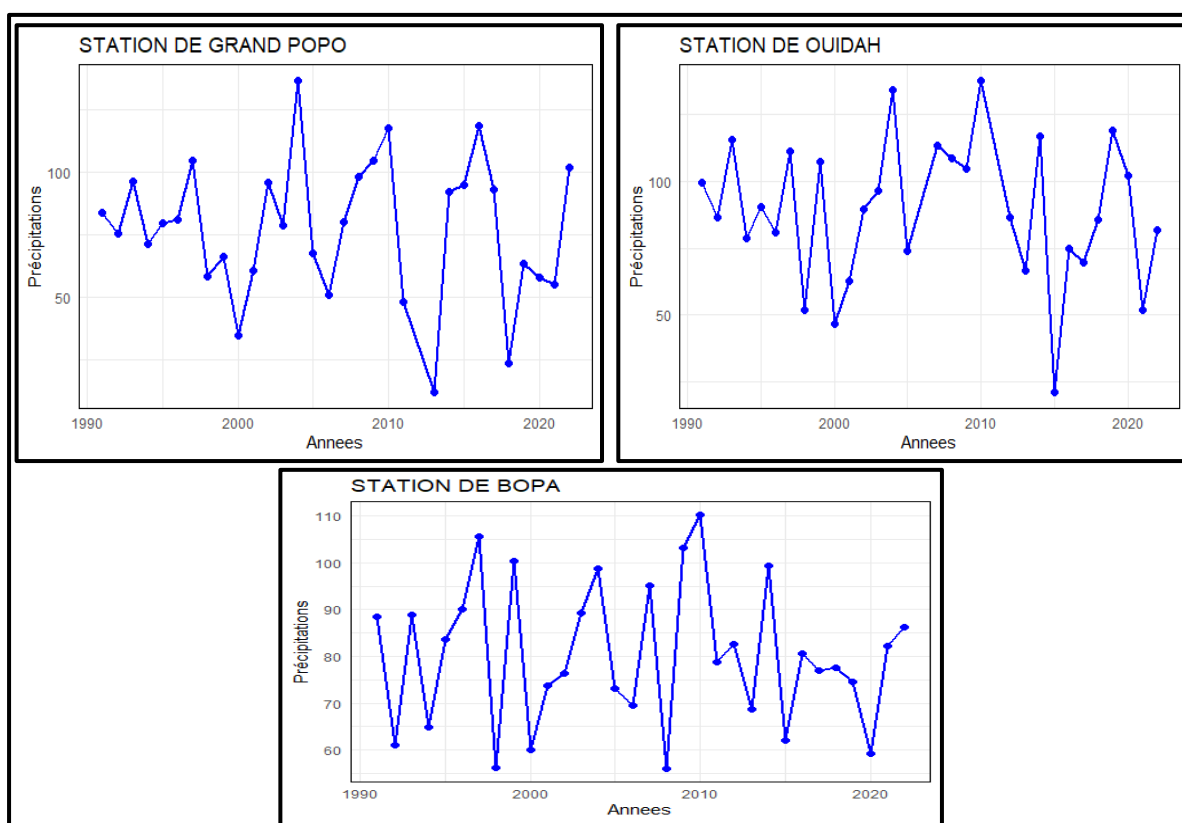


Figure 4: Pluviométrie intermensuelle des stations de Bopa, Grand-Popo et Ouidah

2.2.2 Evolution des indices de précipitations

Les indices pluviométriques calculés à l'aide des séries pluviométriques au niveau des trois stations montrent de forte variabilité suivant toute la période avec le calcul classique de Nicholson (figure 5).

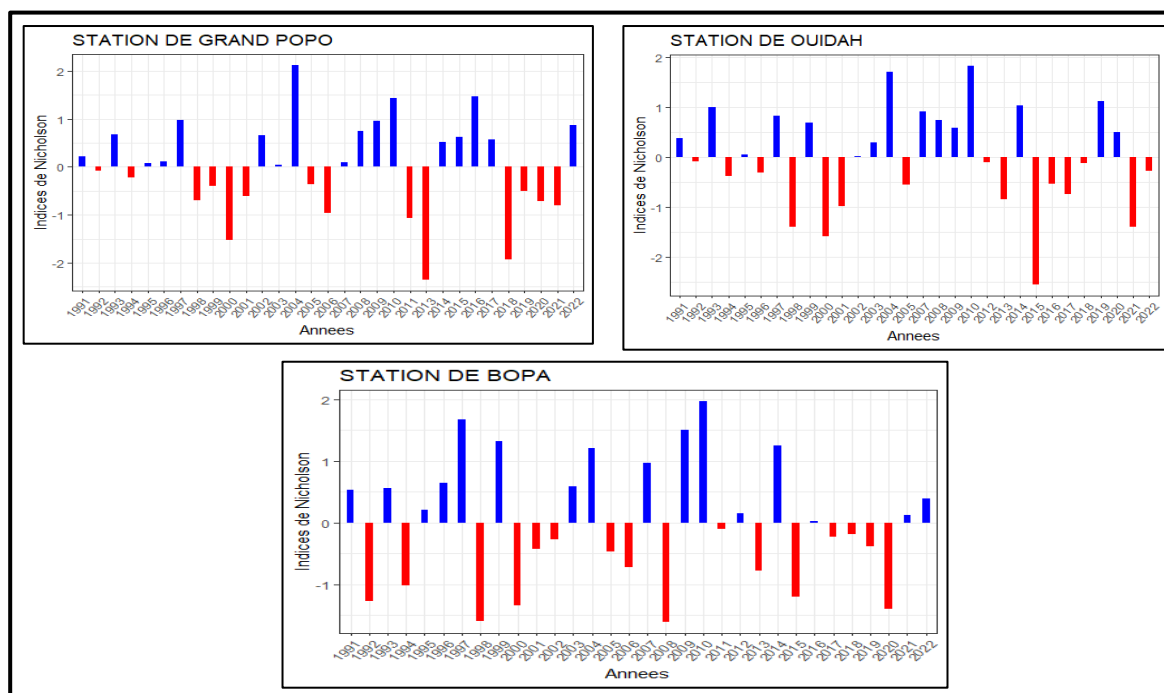


Figure 5: Indices pluviométriques de Nicholson

La méthode de Filtre Passe-Bas de Hanning d'Ordre 2 (figure 6) permet plus précisément 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 et un non stationnarité de l'évolution pluviométrique de 1991 à 2022 sur les stations de grand popo, bopa et ouidah. Deux phases ont été identifiées dans l'évolution de la pluviométrie sur les trois stations. La première phase est marquée par des excédents pluviométriques, et concerne la période 1991-2010 et la deuxième est caractérisée par des déficits pluviométriques entre la période de 2010-2022.

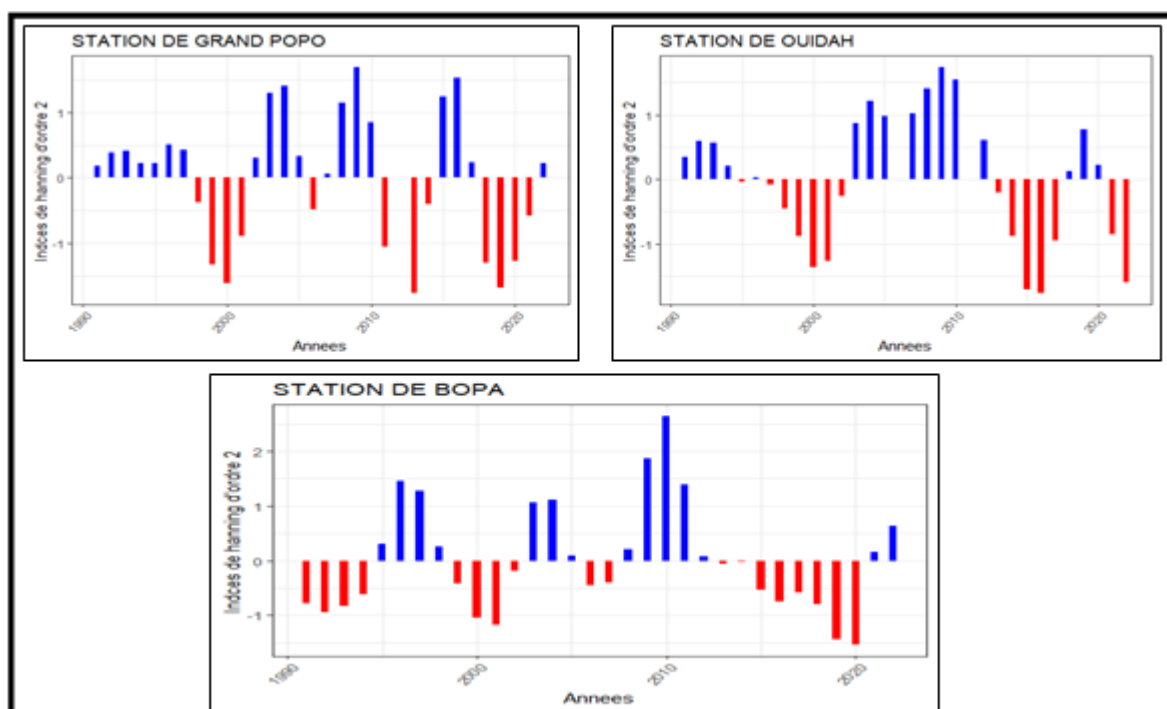


Figure 6: Indices pluviométriques du filtre passe - bas de Hanning d'ordre 2

2.2.3. Détection de rupture dans les séries pluviométriques

L'application de la procédure de segmentation de Hubert des séries pluviométrique avec le logiciel Khronostat n'a présentée aucune rupture au niveau des trois stations. Par contre la méthode bayésienne d'A.F.S. LEE et S.M. Heghinian montre une rupture nette pour l'année 1991 avec une probabilité de 0,0645 au niveau de la station de Bopa. De même sur la station de Ouidah on note une rupture nette avec une probabilité de 0,1284 en 2014 et en fin sur la station de Grand-Popo une rupture nette pour l'année 2017 avec une probabilité de 0,246

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

Dans cette partie, nous allons voir l'état d'évolution du volume d'eau par rapport à l'offre et la demande des communes de Comè et Grand popo.

2.3.1. Evolution du volume d'eau

La figure 8 montre l'évolution du volume d'eau. L'aquifère perforé par la soneb pour la construction des forages est situé dans le bassin sédimentaire côtier du département du mono et présente une capacité de stockage estimée à 600 Millions m³.

2.3.2. Calage et validation du modèle

Le modèle utilisé pour l'allocation ne peut fournir des résultats satisfaisants sans être en adéquation avec la réalité. La performance du modèle WAEP a été donc appréciée à partir des critères statistiques (NSE, KGE et RMSE) dont les résultats sont consignés dans le tableau 4. Toutefois, cette performance est jugée satisfaisante et confirme à l'observation visuelle des courbes de débits observés et simulés avec un Nash de 0.78 en calage et 0.77 en validation. En effet, selon Moriasi et al. (2007), un modèle de simulation est jugé satisfaisant si NSE > 50%, KGE > 50% et RMSE < 60% (Annexe III). Ce modèle est alors jugé performant pour la planification de la ressource en eau.

Tableau 4: Critères de performances au calage et à la validation

Critères de performance	Calage (1991-2000)	Validation (2001-2022)	Valeur de référence
NASH	0.78	0.77	>0.5
KGE	0.68	0.67	>0.5
RMSE	43%	45%	<60%

Les figures 9 et 10 comparent les débits observés et simulés sur la période de 1991-2022 (Calage : 1991-2000 et validation : 2001-2022). A l'analyse de ces figures on constate que les débits observés sont plus proches des débits simulés suivant les deux périodes (calage et validation). La figure 10 présente la validation du modèle hydrologique.

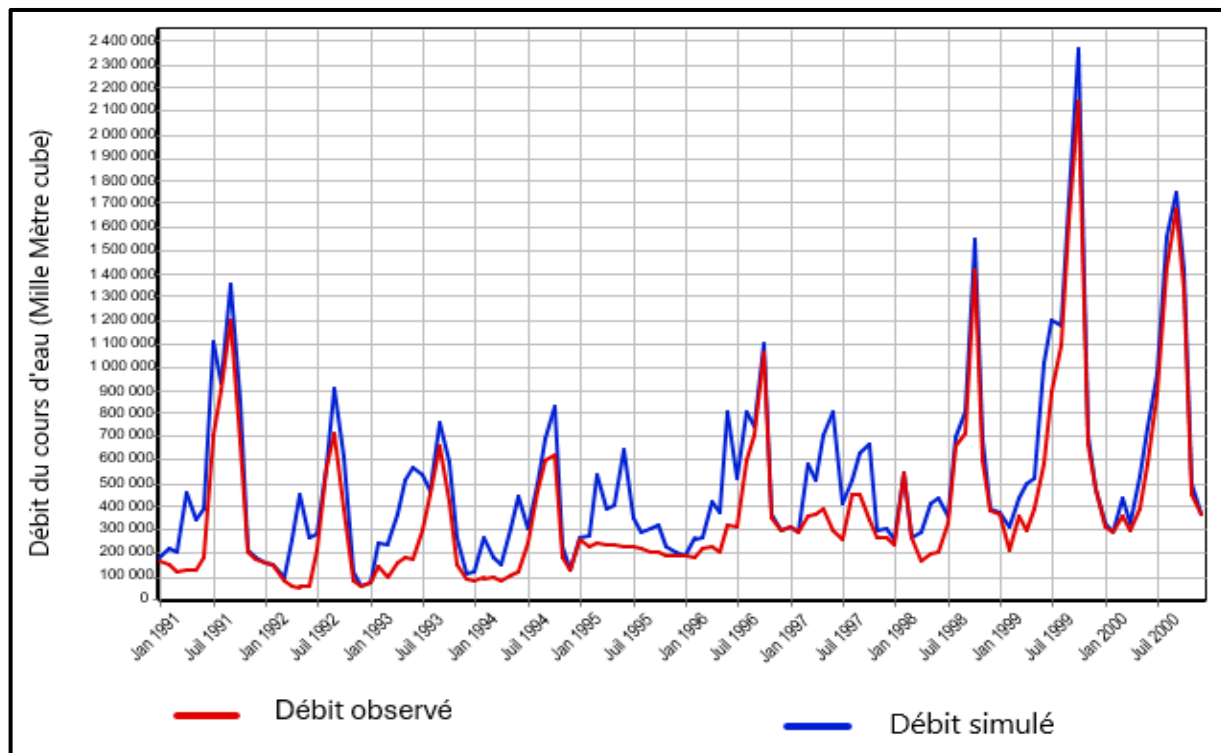


Figure 7: Débits observés et simulés en calage : 1991 à 2000

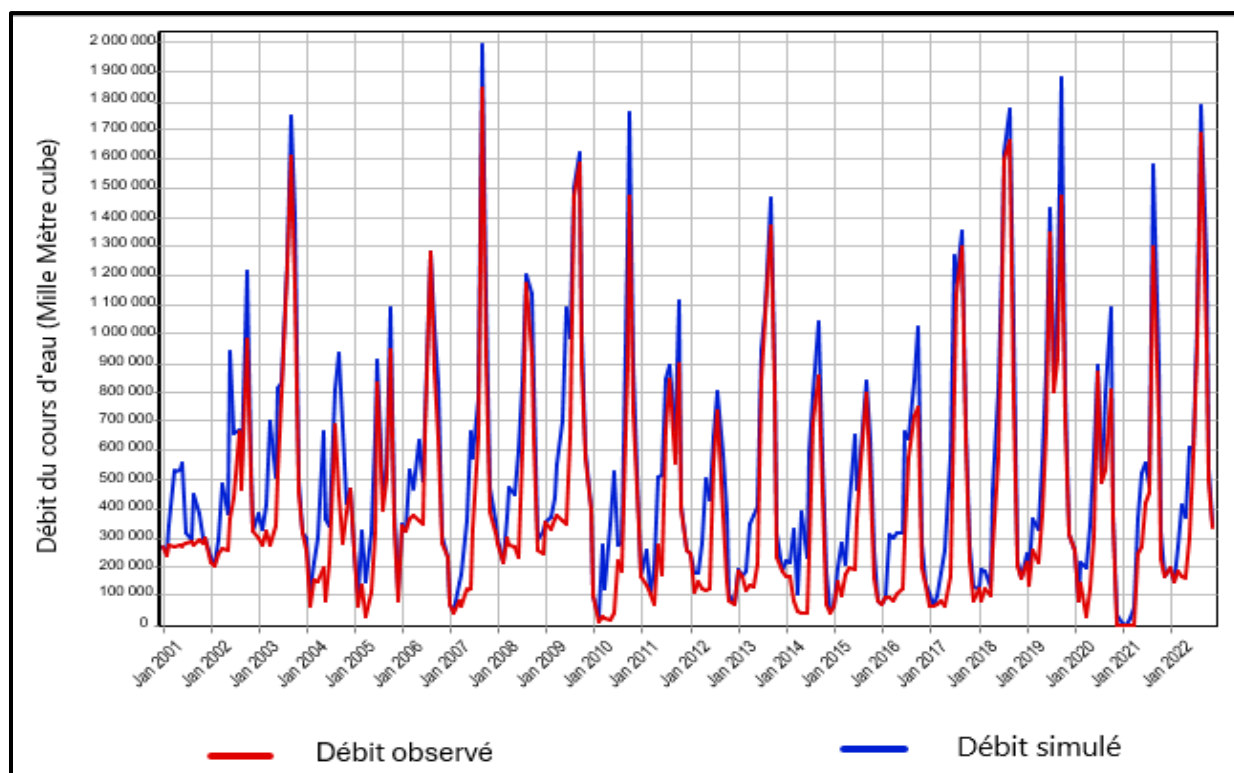


Figure 8: Débits observés et simulés en validation : 2001 à 2022

2.3.3. Débit entrant et sortant

La figure 11 ci-dessous montre une corrélation entre la pluie entrant et le débit sortant du bassin. A l'analyse de cette figure, on constate que les précipitations et le débit augmentent de manière significative avec une différence de 110mm. Cela indique que la quantité de pluie a un impact direct sur la quantité d'eau qui s'écoule dans le bassin. En revanche, on note une corrélation inverse entre la pluie entrant dans le bassin et l'évaporation. Lorsque la pluie augmente, l'évaporation diminue. Il ressort de ces analyses que plus les précipitations sont abondantes, plus une grande quantité d'eau est stockée dans le bassin et moins d'eau s'évapore. Ces résultats sont cohérents avec les principes hydrologiques de base. Une pluie abondante entraîne généralement un ruissellement plus important, car le sol est saturé et ne peut pas absorber toute l'eau (www.u-picardie.fr). De plus, lorsque la pluie est abondante, il y a moins d'énergie solaire disponible pour provoquer l'évaporation ainsi une partie de l'eau s'infiltre pour alimenter la nappe souterraine. En substance, l'analyse de cette figure a permis de mettre en évidence l'importance de la pluie en tant que facteur clé dans le ruissellement de l'eau et l'évaporation.

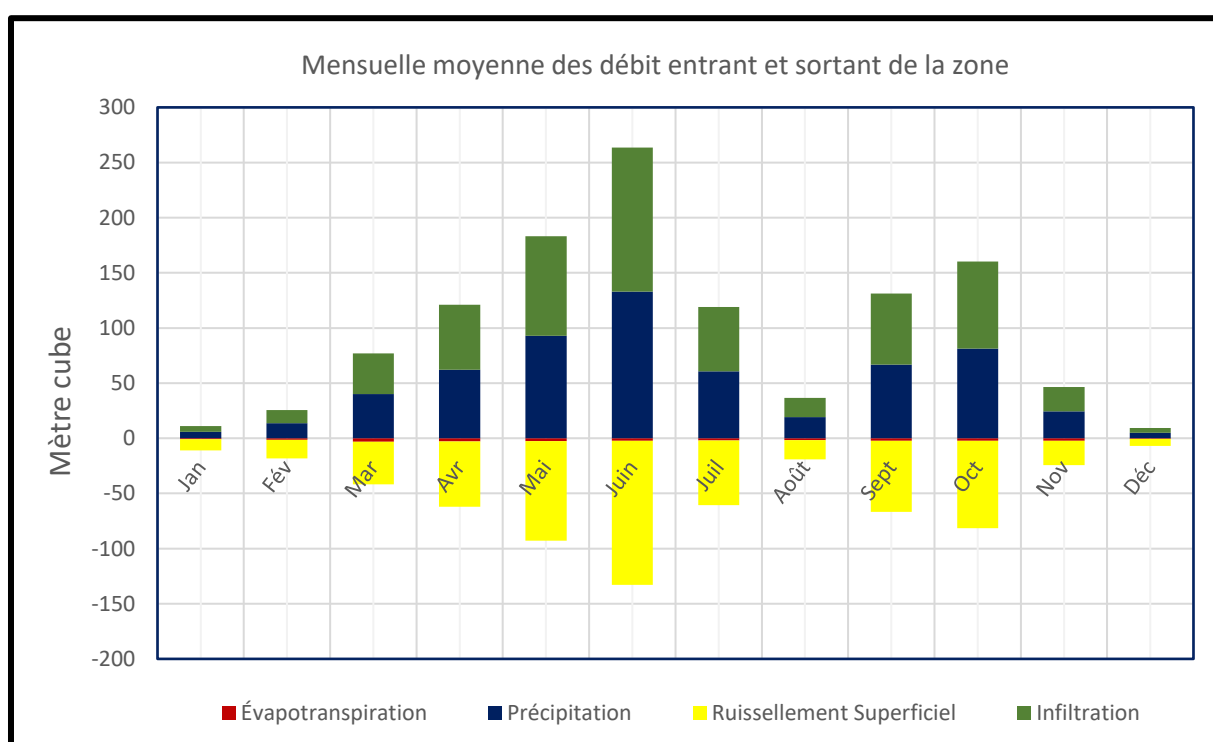


Figure 9: Variation mensuelle de la moyenne des pluie entrant, débit sortant et l'évaporation sur le bassin.

2.3.4. Evolution des demandes non satisfaites de la ville de comè et grand popo

La figure 12 montre l'évolution de la demande en eau non satisfaite de la population.

L'analyse de cette figure révèle que la demande non satisfaite de la ville de comè est plus élevée que celle de grand popo avec des volumes d'eau respectivement égale à 12.500.000 m³ et 3.200.000 m³ en 2050. Cela voudra dire que dans un futur proche, les demandes en eau vont s'accroître plus à comè qu'à grand popo.

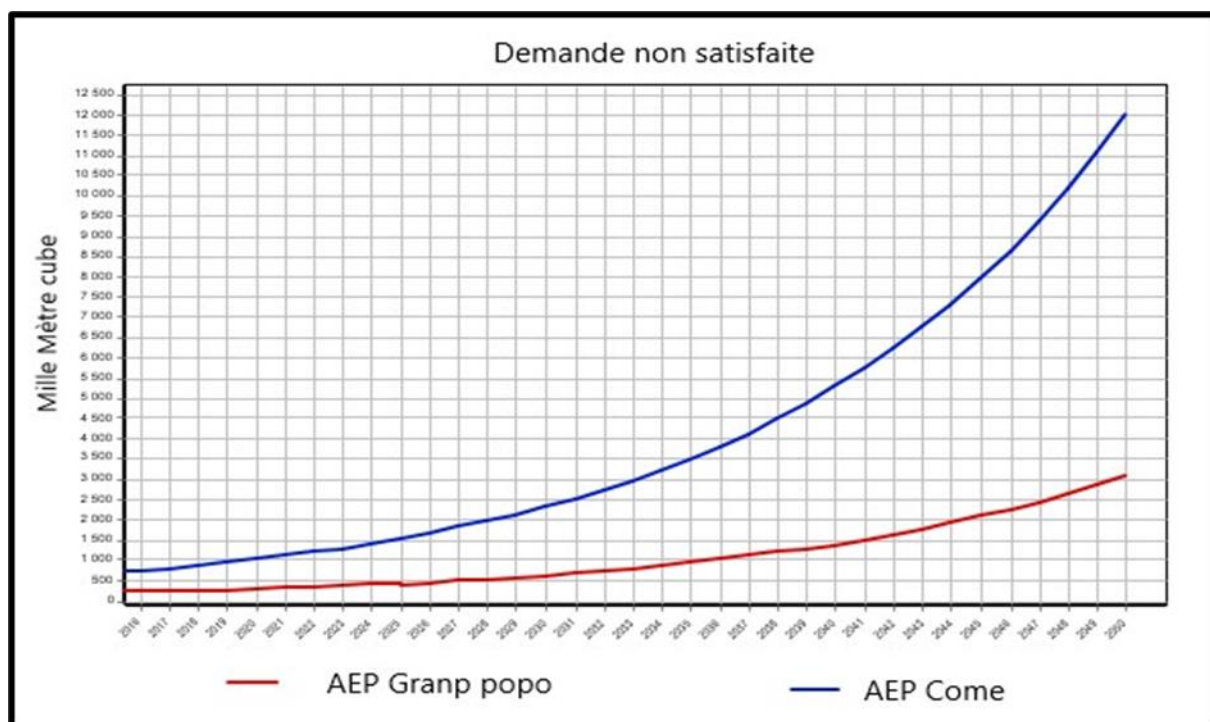


Figure 10: Evolution des demandes non satisfaites des villes de comè et Grand-Popo

2.3.5. Demande en eau basée sur le taux d'accroissement de la population

La demande en eau future est basée sur le taux d'accroissement de la population. A cet effet, l'analyse de la demande en eau pour les deux villes (comè et grand popo) est effectuée sur la base d'un taux d'accroissement respectivement 4.5% et 6%.

2.3.5.1. Evolution des demandes en eau pour la ville de Comè

La figure 13 ci-dessous montre l'évolution de la demande en eau annuelle de Comè de 2015 à 2050 pour un taux d'accroissement de la population de 4.5% et 6%. L'analyse de cette figure indique que la demande en eau pour les besoins de la population augmente progressivement de 2030 à 2050 avec un volume de 14.160.000 m³ en 2050 pour un taux d'accroissement de 4.5% et fortement de 2025 à 2050 avec un volume de 38.800.000 m³ en 2050 pour un taux d'accroissement de 6%. On note ainsi que l'augmentation de la demande pour un taux d'accroissement de 4.5% est légère par rapport à celle du scénario de référence dont le volume est de 12.000.000 m³ en 2050 tandis-que pour un taux d'accroissement de 6% la demande en eau à doubler par rapport au scénario de référence.

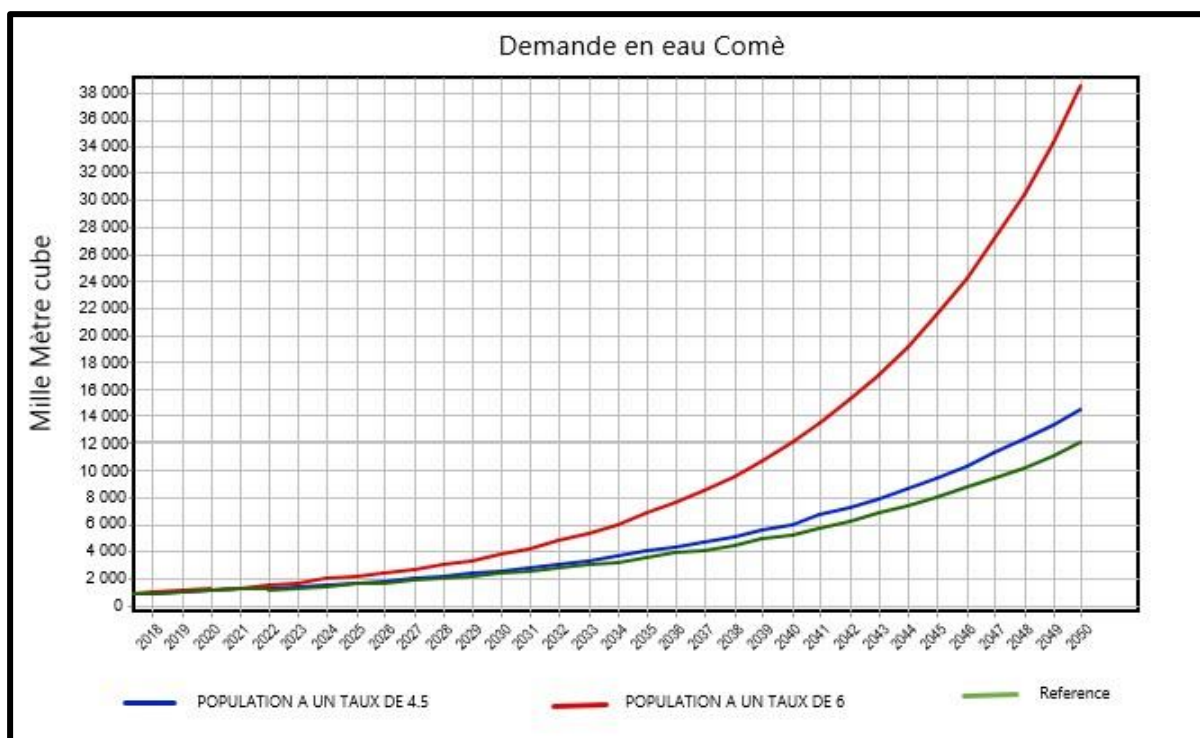


Figure 11: Evolution de la demande en eau de la ville de Comè

2.3.5.2. Evolution des demandes en eau pour la ville de Grand popo

La figure 14 ci-dessous montre l'évolution de la demande en eau annuelle de Grand popo de 2015 à 2050 pour un taux d'accroissement de la population de 4.5% et 6%. L'analyse de cette figure indique que la demande en eau pour les besoins de la population va augmenter progressivement de 2032 à 2050 avec un volume de 4.000.000 m³ en 2050 pour un taux d'accroissement de 4.5% et considérablement de 2024 à 2050 avec un volume de 10.500.000 m³ en 2050 pour un taux d'accroissement de 6%. Pour cela, l'augmentation de la demande pour un taux d'accroissement de 4.5% est légère par rapport à celle du scénario de référence dont le

volume est de 3.100.000 m³ en 2050 tandis-que pour un taux d'accroissement de 6% la demande en eau est fortement élevée par rapport au scenario de référence.

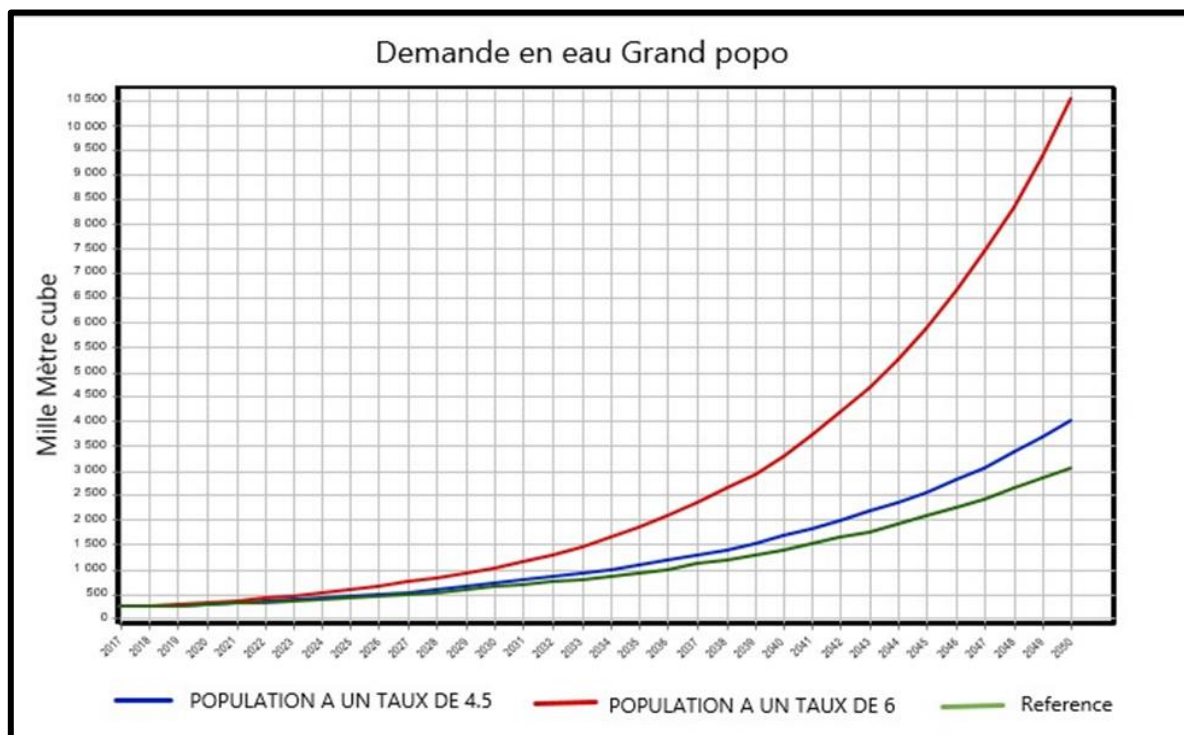


Figure 12 : Evolution de la demande en eau de la ville de Grand-Popo

2.4. Discussion

La caractérisation de la variabilité pluviométrique sur les stations de ouidah, grand popo et bopa de 1991 à 2022 a permis de voir son impact sur les ressources en eau et aux populations du mono. Les méthodes statistiques appliquées aux séries pluviométriques révèlent qu'ils existent des ruptures en 1991, 2014 et en 2017 respectivement pour les stations de bopa, ouidah et grand popo.

Aussi le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles entrainant ainsi une succession de périodes humides allant de 1991-2010 et sèche au cours de la période de 2010-2022. Ces phénomènes ont suscité des modifications entrainant une baisse des précipitations qui s'accompagne d'un déficit des écoulements. Ces différents résultats obtenus sont conformes avec ceux de Houessou et al. (2015) et Lawin et al. (2017). Ces auteurs ont mis en évidence des fluctuations importantes dans les précipitations, avec des années de sécheresse suivies des périodes de forte pluie accompagnées d'une baisse des précipitations causant ainsi des déficits d'écoulement dans la basse vallée du mono. De tel résultat entre aussi en concordance avec les études réalisées par Anani et al. (2019) et Tossou, al. (2020) et Boko et al. (2009).

En projection, l'allocation et les besoins en eau des populations révèlent que la ressource en eau dans le bassin diminue tandis que la demande pour les besoins des populations augmente au fur et à mesure que les années avancent. Houngué (2015) dans son travail, sur l'évaluation des besoins en eau potable dans le département du mono a montré que les ressources en eau potable diminuent par contre les besoins pour l'AEP augmentent et met en place des stratégies pour une gestion plus durable et efficace de l'eau. Les mêmes résultats sont également confirmés par Lama (2017) et Singbo (2016).

2.5. Conclusion

Au terme de ce chapitre on note que la pluviométrie a connu une grande variabilité, et relativement faible entre les trois stations. Les séries pluviométriques présentent une rupture en 1991, 2014 et 2017 respectivement sur les stations de Bopa, Ouidah et Grand popo. Les périodes humides se situent globalement à partir de 1991 à 1998 et de 2003 à 2010 laissant place aux périodes sèches à partir des années 1998 à 2003 et 2010 à 2022. On note ainsi un impact sur les écoulements au niveau des trois stations. On constate également que les besoins en eau des populations, augmentent au fur et à mesure que les années avancent entraînant ainsi la diminution des ressources en eau dans le bassin.

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 la basse vallée du mono plus précisément dans le département du mono s'est appuyée sur les données climatiques et met en évidence l'impact de la variabilité pluviométrique sur les ressources en eau et aux populations. Dans un premier temps, nous avons caractérisé l'impact de la variabilité pluviométrique des stations de Bopa, Grand popo et Ouidah sur les ressources en eau. Ensuite, nous avons modélisé 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 appliqué aux séries pluviométriques ne présente aucune rupture tandis que celle d'A.F.S. Lee et S.M. Heghinian montre une rupture dans la série pluviométrique au cours des années 1991, 2014, et 2017 respectivement sur les stations de Bopa, Ouidah et Grand popo pour la période de 1991 à 2022. 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 en relevant les périodes humides et sèches.

L'application du modèle WEAP pour l'allocation de l'eau à partir de forage pour les besoins des populations de Comè et Grand popo a montré une bonne performance dans la simulation des données. En projection, les demandes en eau futures ont connu des variations. 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 14.160.000 m³ et 4.000.000 m³ d'eau pour un taux d'accroissement de 4,5% et un volume de 38.800.000 m³ et 10.500.000 m³ pour un accroissement porté à 6% en 2050, 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

Cette recherche qui porte sur l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des pluies dans le département du mono est une contribution au débat sur le changement climatique. Elle ne permet pas de confirmer ou d'infirmer les résultats déjà obtenus, mais essaie de situer le degré de concordance avec les résultats de travaux antérieurs.

Au vu ces résultats le logiciel WEAP est un outil très efficace pour l'évaluation et la planification des ressources en eau. Néanmoins, une gestion durable des ressources en eau ne saurait se faire en dehors d'une bonne connaissance du régime des cours d'eau, du potentiel souterrain ainsi que des usages de l'eau. Ainsi il est important de prendre des dispositions pour une meilleure connaissance des ressources en eau :

- Installer et veiller au bon fonctionnement des stations hydrométriques sur les cours d'eau principaux en amont et à l'exutoire de la basse vallée du mono ;
- Installer des stations météorologiques /capteurs afin de faciliter les enregistrements des données climatiques dans le département du mono ;
- 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.
- Tenir compte également de la variabilité future en utilisant les données cordex ou copernicus qui disposent des données d'observation sur 100 ans ».

Bibliographie

- 1- Afouda et al. (1997) « Etude stochastique des structures de séquences sèche au Benin. Sustainability of water resources under Increasing uncertainty » LAHS publ. N° 240, 153-162 pp.
- 2- Alamou E., Quenum G., Lawin E., Badou D. et Afouda A. (2016) « Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'Ouémé, Benin » Pp 315-328
- 3- Aimadé. (2013) « Variabilité spatio-temporelle des hauteurs et nombre de jours de pluies dans le nord-ouest du Bénin, Mémoire de maîtrise », UAC/FLASH/DGAT 30-36p
- 4- Anani et al. (2019) « Variabilité pluviométrique et agriculture dans la basse vallée du Mono au sud-ouest du Bénin ». Pp.17
- 5- Amoussou. (2010) « Variabilité hydro-climatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo » ; Mémoire de DEA, EDP / Université d'Abomey-calavi, Cotonou, Bénin ,105p
- 6- Ahouanton (2004) « Variabilité spatio-temporelle des pluies dans le bas-bénin. » Université d'Abomey-calavi, Maitrise, Pp 15-23
- 7- Ardoin-Bardin et al, (2004) « Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne » (PhD Thesis).
- 8- Atchadé. (2014) « Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière Zou dans le Bénin méridional », Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-calavi, Cotonou, Bénin, 233p
- 9- Assani (1999), « Analyse de la variabilité temporelle des précipitations à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). Sécheresse », vol.10, n°4, p 245 - 252.
- 10- A. F. S. Lee & S. M. A. Heghinian, (1977) « shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: a Bayesian approach. Technometrics », 19(4), Pp 503 -506
- 11- Barbe et al. (1993) « Monographie des ressources en eau superficielles de la République du Bénin », Paris, ORSTOM, 540 p.
- 12- Boko. (1988) « Climats et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de doctorat d'Etat es Lettres et sciences Humaines ». CRC, URA 909 du CNRS, Université de Bourgogne, Dijon, 2volumes, 601 p.

- 13- Cocker, (2020) « Aménagement et gestion des ressources naturelle en eau et changement climatique » Pp 14-23
- 14- Chabi, (2019) « Gestion intégrée des ressources en eau de l'Ouémé à l'exutoire du pont de Savè dans un contexte des changements climatiques » : application à la mise en valeur du réservoir de ilauko ; thèse de doctorat en hydrologie et gestion intégrée des ressources en eau, Pp. 223
- 15- Chamay, (2010) « Pour une gestion intégrée des ressources en eau sur un territoire de montagne. Le cas du bassin versant de Giffre (Haute-Savoie) » Pp 459
- 16- Dawson et al, (2007) « Méthodologie pour l'évaluation des risques d'inondation à l'échelle nationale » Pp 235-247
- 17- Direction Des Etudes Démographiques, (2004) « Cahier des villages et quartiers de ville département du mono ». Pp. 57
- 18- Gbèyétin, (2014) « Inondation dans la basse vallée du mono : typologie et manifestations » Pp 9-18
- 19- Gnonhon. (2022), « Impact de la de variabilite climatique sur la disponibilité en eau du barrage de Djougou et sa mise en valeur pour les besoins de la population » mémoire de fin de formation de licence. Pp. 35-45
- 20- Houngué, (2015). « Evaluation des besoins en eau potable dans le département du mono. Rapport technique » Pp. 43-50
- 21- Hubert. et al. (1989). « Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l 'Afrique de l 'ouest. » Journal Of Hydrology 110, Pp165-183.
- 22- Houessou et al. (2015) « Variabilité pluviométrique et impact sur les cultures dans la basse vallée du mono, bénin ». Pp. 38
- 23- Houndénou. (1999) « Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : exemple du Benin diagnostic et modélisation. Thèse de doctorat de Géographie UMR 5080, CNRS (climatologie de l'Espace Tropical) », Université de Bourgogne, centre de recherche de la climatologie, 341 p
- 24- « Institut national de la statistique et de l'analyse économique (INSAE, 2016) » www.instad.bj , consulté le 23 Décembre 2023.
- 25- Kouton. (2022) « Répartition spatio-temporelle des pluies extrêmes dans le département de l'Atacora au Bénin : trajectoire et vulnérabilité des établissements humains » These De Doctorat De L'universite D'Abomey-Calavi : Uac/Edp-Ecd. Pp. 18-23

- 26- Koumassi, (2015) « Risque hydroclimatiques et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota l'exutoire de Couberi » UAC, Benin.
- 27- Lama. (2017) « Modélisation des besoins en eau agricole dans le département du Mono ». Pp. 23-36
- 28- Lawin et al. (2017) « Analyse des tendances de la pluviométrie et réponses hydrologiques dans la basse vallée du mono (sud-ouest du Bénin) ». Pp 318-319
- 29- Lagnika, (2004) « Contribution à l'élaboration d'une base de données informatisées pour l'analyse et la gestion environnementale des exploitations minières au Bénin »
- 30- « L'atlas de l'eau souterraine en Afrique » hydrogéologie du Bénin » ; Www.Wikipedia.Com
- 31- Mouelhi. (2003) « Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier ». Thèse de Doctorat de l'ENGREF, Cemagref (Antony), Université Paris VI, 323 p.
- 32- Moriasi et al, (2007) « Lignes directrices d'évaluations du modèle pour la quantification systématique de la précision dans les simulations de bassins versants » Pp 885-900
- 33- Mahé, L'hôte Y., Olivry J.C. Et Wotling G. (2001) « Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951-1989 ». Hydrological Sciences Journal, vol. 46, n° 2, p. 211-226.
- 34- Mahé. (2006) « Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique ». Mémoire de d'HDR, Université de Montpellier II, 160 p.
- 35- Nana, (2022) « optimisation de l'allocation des ressources en eau dans une vision prospective : application du modèle weap 21 dans le sous bassin versant de la haute Comoé au (Burkina faso) » Pp. 25-35
- 36- Nicholson S. E. (1994) « The spatial coherence of African rainfall anomalies, Interhémisphérique téléconnexions ». Journal of Climate and applied Meteorology 25, pp. 1365-1381
- 37- N'tcha M'po et al. (2018) « Decreasing past and mid-century rainfall indices over the Ouémé river basin, Bénin (west africa) » climate, 5(3) 74.
- 38- Ogouwalé. (2013) « Changement climatique dans le Bénin méridional et central : Indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire ». Thèse présentée pour obtenir le diplôme de doctorat unique de l'université d'Abomey-Calavi, 302 p.
- 39- Olivry et al, (1993) « Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide » Pp 67-78

- 40- Paturel et al, (1995) « Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin Sécheresse » vol 6, n ° 1, pp. 95-102
- 41- République Du Benin, (1999) « Vision nationale de l'eau e l'an 2025 ». Pp. 11-24
- 42- Servat et al, (1997) « climatic variability in humid africa along the Gulf of Guinea-part 1 : detailed analysis of the phenomenon in cote d'ivoire. » Pp1-15
- 43- Singbo, (2018). « Analyse des politiques de gestion de l'eau dans le département du mono » revue des ressources en eau, 36(4), Pp. 315-330.
- 44- SEI (Stockholm Environment Institute). 2008. « Tutoriel WEAP »
- 45- Soro et al., (2011) « La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) ». Géographie Physique et Environment, Vol.5, Pp.55-73 <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1581>
- 46- Tossou et al. (2020) « Analyse de la variabilité pluviométrique et de son impact sur la disponibilité en eau dans la basse vallée du mono au bénin ». Pp.26
- 47- Tyson et al, (1975) « Changement laïque dans les précipitations sud-africaines : 1880 à 1972 » Q.J.R. Météorol. Pp 817-833
- 48- Van Vyve, (2006) « Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la pluie au Fakara, Niger »Pp 16-
- 49- Vissin. (2007) « Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des Etats de surface sur l'écosystème du bassin béninois du fleuve Niger ». Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne; 310 p.

ANNEXE I

Tableau 5 : Données de débits entrant et sortant des types de la zone (mètre cube)

Variable	Évapotranspiration	Précipitation	Ruissellement Superficiel	Infiltration
Jan	-0.693142	5.84938	-10.3125	5.15624
Fév	-1.46764	13.5604	-16.6275	12.0927
Mar	-3.03684	39.9973	-38.7205	36.9605
Avr	-2.98953	62.0222	-59.0326	59.0326
Mai	-2.64264	92.9332	-90.2906	90.2906
Juin	-2.24774	132.891	-130.643	130.643
Juil	-2.10162	60.5925	-58.4909	58.4909
Août	-1.73677	19.2083	-17.4715	17.4715
Sept	-2.31501	66.7408	-64.4258	64.4258
Oct	-2.40295	81.3725	-78.9695	78.9695
Nov	-2.21122	24.3294	-22.1182	22.1182
Déc	-0.613334	4.96415	-6.38119	4.35081

ANNEXE II

Tableau 6 : Evolution des demandes en eau

Scénario/années	Ville de comè			Ville de grand popo		
	POPULATION A UN TAUX DE 4.5%	POPULATION A UN TAUX DE 6%	Référence	POPULATION A UN TAUX DE 4.5%	POPULATION A UN TAUX DE 6%	Reference
2015	730987	730987	730987	200108	200108	200108
2016	730987	730987	730987	200108	200108	200108
2017	798256	821337	793679	218523	224841	216853
2018	871715	922854	861748	238633	252632	235000
2019	951935	1036919	935655	260593	283857	254665
2020	1039537	1165082	1015900	284574	318942	275976
2021	1135200	1309086	1103028	310762	358363	299069
2022	1239667	1470889	1197628	339360	402657	324096

**VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE : IMPACTS SUR LES RESSOURCES EN EAU
ET ALLOCATION AUX POPULATIONS DU MONO**

2023	1353747	1652691	1300342	370589	452425	351217
2024	1478326	1856963	1411864	404693	508345	380607
2025	1614368	2086484	1532951	441935	571176	412456
2026	1762931	2344373	1664423	482604	641774	446971
2027	1925164	2634138	1807171	527015	721097	484374
2028	2102328	2959717	1962161	575514	810225	524907
2029	2295794	3325538	2130444	628475	910368	568832
2030	2507065	3736575	2313159	686311	1022890	616432
2031	2737778	4198415	2511545	749469	1149319	668016
2032	2989721	4717339	2726945	818438	1291375	723916
2033	3264851	5300403	2960819	893755	1450989	784494
2034	3565298	5955532	3214751	976003	1630331	850141
2035	3893395	6691636	3490461	1065820	1831840	921282
2036	4251685	7518723	3789817	1163902	2058256	998375
2037	4642946	8448036	4114847	1271010	2312656	1081920
2038	5070213	9492214	4467752	1387975	2598500	1172457
2039	5536799	10665451	4850924	1515703	2919675	1270569
2040	6046324	11983701	5266959	1655185	3280547	1376892
2041	6602736	13464886	5718674	1807504	3686022	1492111
2042	7210353	15129147	6209131	1973839	4141615	1616972
2043	7873886	16999109	6741651	2155482	4653519	1752282
2044	8598480	19100199	7319842	2353840	5228693	1898915
2045	9389756	21460984	7947621	2570452	5874960	2057818
2046	10253848	24113561	8629240	2806998	6601105	2230019
2047	11197458	27093997	9369319	3065312	7417001	2416629
2048	12227904	30442816	10172869	3347398	8333743	2618855
2049	13353177	34205548	11045335	3655442	9363794	2838003
2050	14582003	38433354	11992627	3991834	10521158	3075490
Sum	165826617	344199669	144033259	45395156	94224908	37636826

ANNEXE III

Tableau 7 : Variation mensuelle et consommation en eau

MOIS	VARIATION MENSUELLE (%)	CONSOMMATION EN EAU COME (m3)	CONSOMMATION EN EAU GRAND POPO (m3)
Jan	8.49	72540	24180
Fév	7.67	65520	21840
Mar	8.49	72540	24180
Avr	8.21	51300	17100
Mai	8.49	53010	17670
Juin	8.21	51300	17100
Juil	8.49	53010	17670
Août	8.49	72510	24170
Sept	8.21	70200	24150
Oct	8.49	53010	17670
Nov	8.21	70200	24150
Déc	8.21	72540	24180
Consommation d'eau	99.66	757680	229880

- Hypothèses de calcul pour l'AEP :
 - Nombre de ménage en 2016 :18862
 - Taux d'accroissement: 4.5 %
 - Soit $X_1 = 18862$

Supposons que 25%, non abonnés achète de l'eau alors le nombre de personne consomme l'eau est égal à :

$$X_2 = 18862 \times 25/100 + X_1 \text{ soit } X_2 = 24637.5$$

Si l'eau vendu annuellement est égal à :

$$\text{Eau (vendu)} = 757680 \text{ m}^3$$

$$\text{Alors le taux de consommation} = \text{Eau(vendu)}/N_p$$

Avec N_p = Nbr de personnes consommé l'eau

Taux = 757680/24637.5 Donc **Taux = 32.13 m³/hbt/an**

- **Critère de performance de NASH**

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

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{jsim} - Q_{jobs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{jobs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (11)$$

Ce critère permet de mesurer le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées. Le critère de NASH peut varier de $-\infty$ à 1. La valeur optimale (estimation parfaite) est un (1). Une valeur nulle signifie que le modèle n'est meilleur que si on avait remplacé toutes les valeurs simulées par le débit moyen (Nash, J.E. 1970). On considère classiquement que la simulation est bonne lorsque ce coefficient tend vers un (1) à valeur positive.

- **Erreur Quadratique (RMSE)**

L'erreur quadratique moyenne :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{jsim} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (12)$$

Où :

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

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