



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Évaluation de la disponibilité de l'eau de la retenue de la
Loka dans un contexte d'anthropisation et de
changement climatique
(Bouaké, Centre de la Côte d'Ivoire)**

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0296/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0410001416

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Soutenu publiquement
le : 17/12/2020

Présenté par :

ATCHO Ange Victorine

JURY

Président : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES.....	i
DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS.....	4
1.1 Présentation de la zone d'étude	5
1.1.1 Situation géographique de la zone d'étude.....	5
1.1.2 Climatologie et régime pluviométrique	6
1.1.3 Réseau hydrographique	6
1.1.4 Géomorphologique	7
1.1.5 Végétation.....	8
1.1.6 Géologie et pédologie	8
1.1.7 Démographique.....	8
1.2 Contexte de l'étude.....	9
1.2.1 Approvisionnement en eau potable de la ville de Bouaké.....	9
1.2.2 Variabilité climatique	10
1.2.2.1 Définition de la variabilité climatique	10
1.2.2.2 Caractérisation de la variabilité climatique	10
1.2.2.3 Conséquences de la variabilité climatique sur les ressources en eau	11
1.3 Évaluation des ressources en eau	11
1.4 Modélisation.....	12
1.4.1 Définition.....	12
1.4.2 Modèle SWAT.....	12
1.4.2.1 Fonctionnement du modèle SWAT.....	13

Table des matières

1.4.2.2 Évaluation de la performance du modèle SWAT	16
1.4.2.2.1 Analyse de sensibilité et d'incertitude du modèle.....	16
1.4.2.2.2 Fonction objective	16
1.4.2.2.3 Calibration et validation du modèle	16
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	18
2.1 Matériel	19
2.1.1 Données	19
2.1.1.1 Données climatiques	19
2.1.1.2 Données hydrométriques.....	19
2.1.1.3 Données morphologique.....	19
2.1.1.4 Données spatiales	19
2.1.2 Logiciels	22
2.2 Méthodes	22
2.2.1 Étude de la variabilité climatique par l'analyse des indices de Nicholson.....	22
2.2.2 Quantification des flux d'eau de la retenue de la Loka	22
2.2.2.1 Prétraitement	22
2.2.2.2 Traitement	23
2.2.2.2.1 Délimitation du bassin versant et de ses sous bassins versants.....	23
2.2.2.2.2 Définition des unités de réponse hydrologiques (URH)	23
2.2.2.2.3 Importation de données climatiques.....	24
2.2.2.2.4 Création des tables d'entrée par le modèle.....	24
2.2.2.2.5 Simulation	24
2.2.2.3 Post-traitement	25
2.2.2.3.1 Analyse de sensibilité du modèle	25
2.2.2.3.2 Évaluation de la performance du modèle	26
2.2.2.3.3 Calibration et validation du modèle	27
2.3 Évaluation de l'adéquation disponibilité-besoin en eau.....	28

Table des matières

2.3.1 Détermination des périodes Hydrologiques.....	28
2.3.2 Adéquation disponibilité-besoin en eau.....	28
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	29
3.1 Résultats	30
3.1.1 Caractérisation de la variabilité climatique par les indices de Nicholson	30
3.1.2. Résultat de la restitution des débits de la Loka à l'aide du modèle SWAT.....	31
3.1.2.1 Analyse de la simulation du modèle SWAT.....	31
3.1.2.2 Résultat de la calibration du modèle SWAT.....	31
3.1.2.3 Résultats de la validation du modèle SWAT	32
3.1.2.4 Présentation des flux d'eau dans le réservoir.....	33
3.1.2.4.1 Débits d'eau entrant la retenue de la Loka	33
3.1.2.4.2 Apports de sédiments	35
3.1.2.4.3 Volume d'eau dans la retenue de la Loka	36
3.1.2.4.4 Évaporation d'eau au-dessus de la retenue de la Loka.....	38
3.1.2.5 Bilan hydrologique.....	40
3.1.3 Résultat de l'évaluation de la disponibilité-besoin en eau.....	40
3.1.3.1 Analyse des périodes hydrologiques (1980-1997).....	40
3.1.3.2 Résultat de l'adéquation disponibilité-besoin en eau.....	41
3.2 Discussion	42
CONCLUSION	44
REFERENCES	47
Résumé	53

DÉDICACE

« L'eau est l'organe du monde », Bachelard Gaston, 2016

Je dédie ce modeste travail à ma mère Madame Kouamé Amenan

Amélie l'organe de ma vie. Je t'aime Maman !!!!

Remerciements

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours et au dévouement de plusieurs personnes. En guise de reconnaissance, je tiens à leur témoigner toute ma gratitude et mes sincères remerciements pour leurs contributions de près ou de loin au bon déroulement de mon stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à l'endroit de Madame la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, le Professeur **TIDOU Abiba Sanogo épouse KONÉ** pour son dévouement et le travail abattu dans l'avancée l'Université Jean Lorougnon Guédé.

J'exprime ma gratitude à Monsieur le Directeur d'UFR, Professeur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire, pour son efficacité, ses initiatives, ses collaborations, et surtout ses efforts nourris dans la bonne marche de l'UFR Environnement.

J'adresse un vif remerciement à Monsieur **KOUAME Brou Paul**, Directeur Technique National de la SODECI, pour sa générosité, son appui à mon insertion professionnelle à la Direction Régionale de la SODECI Bouaké.

Je remercie également Monsieur **KOUADIO N'Guessan Konan**, Directeur Régional de la SODECI Bouaké, qui sans hésitation a autorisé mon stage au sein de la structure.

J'adresse mes sincères remerciements au Docteur **DIBI Brou**, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE). Merci de m'avoir fait confiance et d'accepter de recevoir ce travail dans les annales du laboratoire.

Je remercie Docteur **KONAN Kouakou Séraphin**, Maître de Conférences, Directeur Scientifique de ce travail, pour sa confiance. Je vous réitère ma reconnaissance pour m'avoir inculqué l'amour du travail bien fait.

J'adresse également mes remerciements à Docteur **MANGOUA Oi Mangoua Jules**, Maître-Assistant et Responsable du parcours Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour ses conseils, et sa disponibilité.

Mes sincères gratitude vont à l'endroit du Docteur **ANOHI Kouao Armand**, Maître-Assistant, encadreur de ce travail. Vos conseils ont suscité en moi des sentiments de persévérance dans l'effort. Cher maître, votre rigueur, vos conseils, vos directives et votre mine toujours joviale en toute circonstance m'ont donné espoir dans les moments de peine.

Remerciements

À tous le corps Enseignants-Chercheurs des UFR Agroforesterie et Environnement, merci pour les conseils, les connaissances scientifiques et pédagogiques inculqués au cours de mon parcours universitaire.

J'exprime aussi ma gratitude à Monsieur **ASSOUA Christophe**, Adjoint Technique de la SODECI Bouaké, pour son aide précieuse et sa disponibilité dans la réalisation de ce travail.

Je souhaiterai remercier aussi tous les Agents de la Direction Régionale de la SODECI Bouaké pour leur chaleureux accueil et leur générosité manifestés envers ma personne. Je remercie en particulier Madame **DJEDJE**, Assistance de Direction ; Madame **BINI**, Responsable à la Facturation ; Monsieur **SORO Loka** Responsable Électromécanicien ; et Monsieur **KOFFI Kouadio Pacôme**, Agent de réseau.

Je dis également un grand merci à la famille **TOURÉ** et à Monsieur **BAMBA Mamadou**, pour le survis, les conseils et le soutien apportés à ma personne durant ces années d'étude universitaire.

Je remercie également la promotion Master 2 de Génie de l'Eau et de l'Environnement 2019 pour leurs soutiens et leurs compagnies.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

DHH	: Direction de l'Hydraulique Humaine
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation
INS	: Institut National de la Statistique
MNA	: Modèle Numérique d'Altitude
ONEP	: Office Nationale de l'Eau Potable
SIG	: Système d'Information Géographique
SODECI	: Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
SUFI2	: Sequential Uncertainty Fitting
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	: Soil and Water Assessment Tool- Calibration Uncertainties Program
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLOG	: Université Jean Lorougnon Guédé
USDA	: United States Department of Agriculture
URH	: Unité de Réponse Hydrologique
UTM	: Universal Transversal Mercator
WGS	: World Geodetic system

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	: Évolution démographique de la ville de Bouaké.....	8
Tableau II	: Classification des sécheresses selon les valeurs de ISP Erreur ! Signet non défini.	
Tableau III	: Paramètres du modèle.....	25
Tableau IV	: Indice standardisé de la pluviométrie sur le bassin versant de la Loka Erreur ! Signet non défini.	
Tableau V	: Paramètres sensible au modèle SWAT	31
Tableau VI	: Paramètres d'évaluation de la performance du modèle (1980-1997).....	32
Tableau VII	: Paramètres d'évaluation de la performance du modèle (2000-2006).....	33
Tableau VIII	: Bilan hydrologique du bassin versant de la Loka (1980-2006).....	40
Tableau IX	: Analyse des périodes hydrologiques (1980-1997).....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	5
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Bouaké	6
Figure 3 : Réseau hydrographique de la zone d'étude	7
Figure 4 : Cartographie des altitudes du bassin de la Loka.....	7
Figure 5 : Assèchement du barrage de la Loka de Bouaké	9
Figure 6 : File d'attente pour un ravitaillement en eau potable.....	10
Figure 7 : Carte pédologique du bassin versant du lac de Kossou	20
Figure 8 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du lac de Kossou	21
Figure 9 : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Bouaké	30
Figure 10 : Évolution de la température moyenne de 1960 – 2000	30
Figure 11 : Calibration du modèle SWAT à la station de Marabadiassa	32
Figure 12 : Validation du modèle SWAT à la station de Marabadiassa	33
Figure 13 : Débits mensuels d'eau entrant dans le réservoir.....	34
Figure 14 : Débits interannuels d'eau entrant dans le réservoir	34
Figure 15 : Charges mensuelles de sédiments dans le réservoir	35
Figure 16 : Charges interannuelles de sédiment dans le réservoir de 1981-1997	36
Figure 17 : Volumes mensuels d'eau dans le réservoir.....	37
Figure 18 : Volumes interannuels d'eau dans le réservoir.	38
Figure 19 : Variabilité de l'évaporation mensuelle au-dessus de la retenue de la Loka.....	39
Figure 20 : Variabilité interannuelle de l'évaporation au-dessus de la retenue de la Loka	39
Figure 21 : Adéquation disponibilité-besoin en eau.....	41

INTRODUCTION

Introduction

L'eau, source de vie sur Terre, apparaît comme un facteur de développement pour notre société. Cela paraît avantageux, car près de 71 % de la surface de la Terre (soit presque les trois quart) est recouverte par de l'eau (mers, océans, lacs, cours d'eau) (Anoh, 2014). Cependant, la majeure partie de cette eau (97,5% présente sous forme d'eau salée) est difficilement valorisable pour les activités humaines (Youan, 2008). Selon Deschenes (2000), seulement une faible proportion des 2,5% de l'eau terrestre restante est mobilisable et potentiellement utilisable par l'homme. En effet, l'eau douce continentale liquide est paradoxalement une source globalement rare dont la majorité se situe dans les nappes souterraines. Dès lors, la problématique de la disponibilité en eau potable est une des préoccupations majeures pour tous les pays du monde en général et pour toutes les grandes agglomérations africaines en particulier. C'est donc dans cette optique que les instances internationales ont inscrit l'accès à l'eau potable parmi les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) (MEFP, 2018). Malgré les nombreux efforts consentis (grands nombres de conférences internationales portant sur l'eau), la question de l'eau potable en Côte d'Ivoire à l'instar des pays d'Afrique subsahariens, n'est guère reluisante (Mangoua, 2013).

En effet, à Bouaké comme partout en Côte d'Ivoire, le développement de la quasi-totalité des secteurs de l'économie est tributaire des ressources en eau. Or, la commune de Bouaké est alimentée par trois barrages, celui de Kan, de Gonfreville et de la Loka. Malheureusement, le barrage de la Loka qui alimente les deux tiers de la ville en eau potable s'est asséché. Les populations de ces zones, privées d'eau ont eu recours à des puits ou à des forages privés situés à plusieurs kilomètres de leurs habitations pour leur quotidien (Maillard, 2019). Cet assèchement de la retenue observé durant les mois de Mai, Juin et Juillet 2018 serait imputable aux changements climatiques et à l'anthropisation. Ainsi, au niveau climatique, d'importantes études des fluctuations pluviométriques à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest en général et de la Côte d'Ivoire en particulier ont montré qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée depuis les années 1960 (Goula *et al.*, 2006 ; Kouassi, 2007). Ces anomalies pluviométriques constatées depuis près de quatre décennies ont connu une résonance exceptionnelle dans les régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire (Aké, 2010). A ces sécheresses, s'ajoute une croissance démographique galopante non adaptée à l'évolution des infrastructures hydrauliques de la commune de Bouaké. En effet, la crise socio-politique qui a secoué la Côte d'Ivoire en 2011 a grandement affectée l'approvisionnement en eau potable, du fait du déplacement des populations vers Bouaké et ses environs (INS, 2014). Cette croissance démographique, en plus d'augmenter la demande en eau potable (Djè, 2018) a exercé une pression sur le milieu naturel

Introduction

à travers une modification constante du paysage à des fins agricoles ; contribuant ainsi à l'éclosion des sols nus (Kouamé, 2013). Or l'augmentation des sols nus est source d'intensification de l'érosion (Koua, 2014). En plus, elle conduit à un dépôt régulier de sédiment dans le canal lors du ruissèlement des eaux. Ce qui diminue constamment le volume réel du canal.

Face à ces différents problèmes que traverse la retenue de la Loka, les seules études menées ne concernent que la bathymétrie. Elles ont permis de déterminer le volume actuel du canal. Or, une gestion plus précise de la retenue qui réduise au maximum les pertes et prend en compte les variations climatique serait indispensable. Une telle gestion nécessite une connaissance toujours plus détaillée des différents éléments du bilan d'eau et des processus agro-hydrologiques. Ainsi, il apparaît plus qu'urgent de mettre en place un outil de veille et d'aide à la décision de sorte à pouvoir prévenir d'éventuelles perturbations de la disponibilité de l'eau potable. C'est dans cette optique que le Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) a initié cette étude dont le thème est « **Évaluation de la disponibilité en eau de la retenue de la Loka dans un contexte d'anthropisation et de changement climatique (Bouaké, Centre de la Côte d'Ivoire)** ». L'objectif principal de cette étude est de comprendre le fonctionnement hydrologique de la retenue de la Loka utilisé pour l'alimentation en eau potable de la ville de Bouaké. L'étude permettra de façon spécifique de :

- caractériser la variabilité climatique sur le bassin versant de la Loka ;
- quantifier les flux d'eau de la retenue de la Loka ;
- analyser l'adéquation disponibilité-besoin en eau de la retenue de la Loka.

La méthodologie adaptée pour l'élaboration de ce travail s'articule autour de trois axes principaux. En premier lieu, nous aurons une généralité, ensuite le matériel et les méthodes enfin les résultats et la discussion. Nous terminerons par une conclusion suivie de quelques perspectives.

PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS

1.1 Présentation de la zone d'étude

1.1.1 Situation géographique de la zone d'étude

Le bassin versant de la Loka est situé dans la région administrative du Gbêkê, précisément au Nord-ouest de la ville de Bouaké. Il est géographiquement situé entre les longitudes $05^{\circ}14'$ et $05^{\circ}06'$ Ouest et les latitudes $07^{\circ}46'$ et $07^{\circ}42'$ Nord. Le bassin versant de la Loka est un sous bassin du fleuve Bandama et occupe une superficie de $133,50 \text{ km}^2$. La Loka est une rivière sur laquelle a été réalisé en 1978 le barrage de la Loka. Le barrage se trouve précisément à $22,5 \text{ km}$ du centre-ville de Bouaké, sur l'axe Bouaké-Béoumi. Sa situation géographique est entre les longitudes $05^{\circ}14'$ et $05^{\circ}11'$ Ouest et les latitudes $07^{\circ}44'$ et $07^{\circ}42'$ Nord. Le barrage est bordé par une montagne sacré appelée « Fli », et par des villages tels que Messoukro et Kouamé-Yakro. La retenue de la Loka a une capacité de 25 millions de mètres cubes et une superficie de 2 millions mètres carrés.

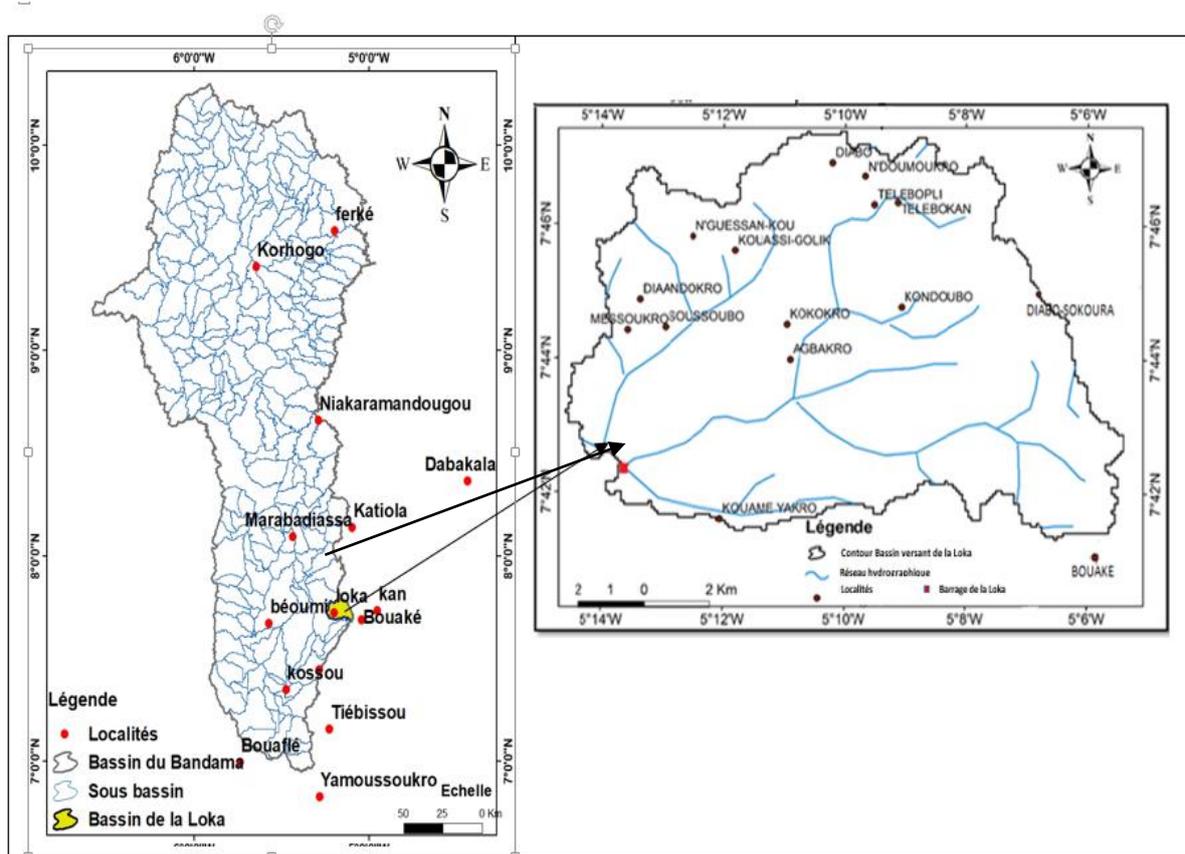


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.1.2 Climatique et régime pluviométrique

Le bassin versant de la Loka se situe dans le climat équatorial de transition atténué appelé le climat Baouléen. Ce climat est caractérisé par deux saisons :

- Une saison sèche de Novembre à Février marquée par le Harmattan ;
- Une saison pluvieuse de Mars à Octobre ;

Depuis les années 1965, la pluviométrie du bassin versant de la Loka est en baisse. En effet, selon Kouassi *et al.* (2010), la pluviométrie était caractérisée par des hauteurs de pluies annuelles qui variaient de 1 500 mm à 1 700 mm. Actuellement, elles oscillent entre 1 139 mm et 1 600 mm, enregistrant un taux d'humidité compris entre 60 et 70 %. Pendant l'année hydrologique, le mois de Janvier est le moins pluvieux avec une pluviométrie de 11 mm tandis que le mois de Septembre est le plus pluvieux, avec une pluviométrie moyenne de 194 mm (Figure 2). La tendance moyenne de la température mensuelle varie de 23,6 °C à 27,7 °C respectivement pour le mois d'Août et Février (Kouassi *et al.*, 2013).

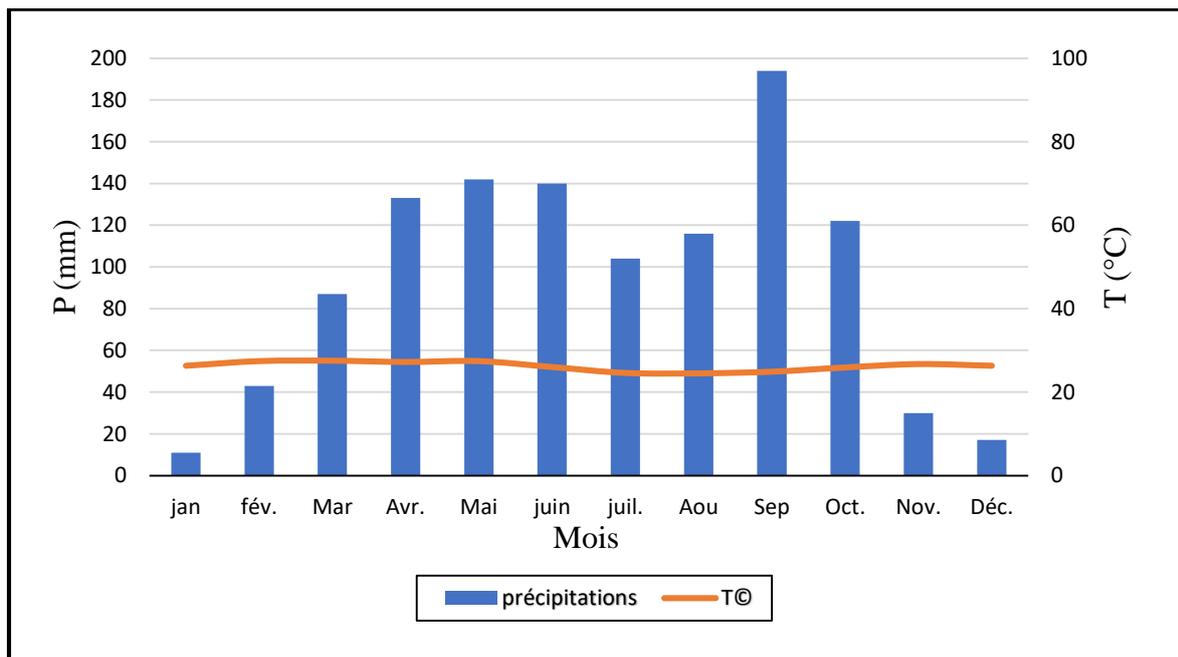


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique de Bouaké (1980-2010)

1.1.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la Loka est clairement développé sur le cours d'eau Bandama. Il prend sa source à 3 km à l'Ouest de la retenue et son confluent Aboliba est situé à l'intérieur du périmètre urbain. Il est dominé par un régime tributaire (Figure 3).

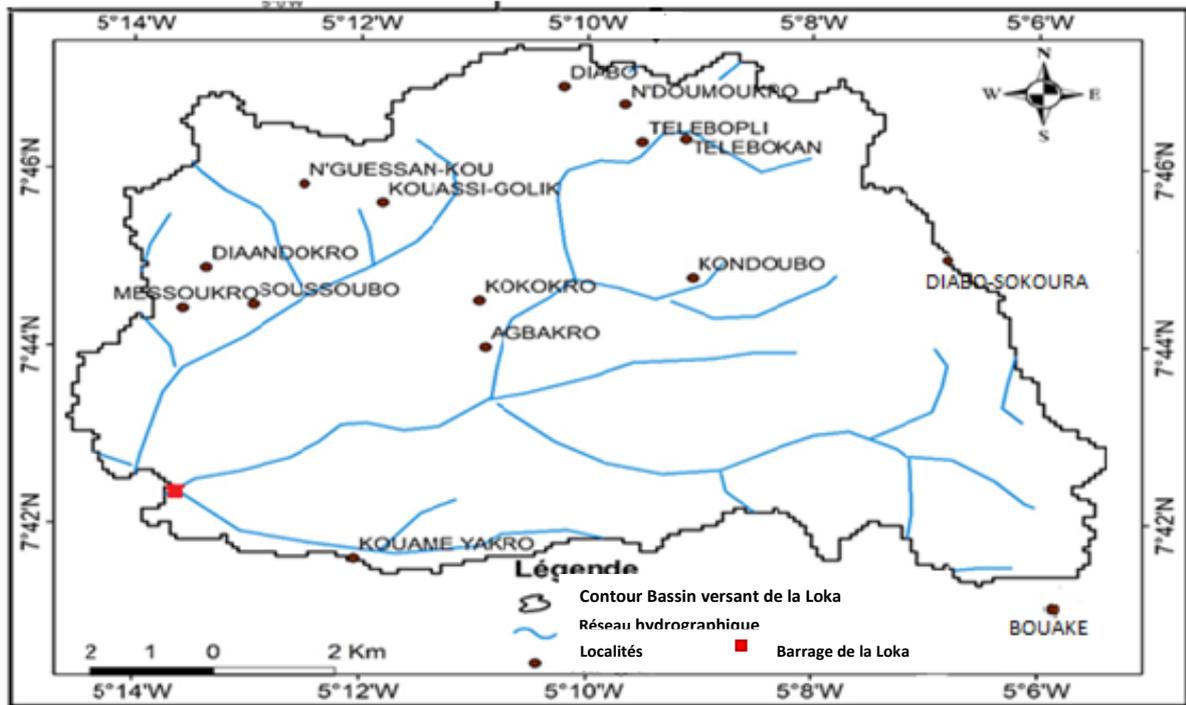


Figure 3 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

1.1.4 Géomorphologique

Le bassin versant de la Loka avec ses rubans marécageux a des lits peu profonds et des pentes également peu prononcées (Kouamé, 2012). Le bassin versant de la Loka entre les altitudes 196 m et 406 m (Figure 4).

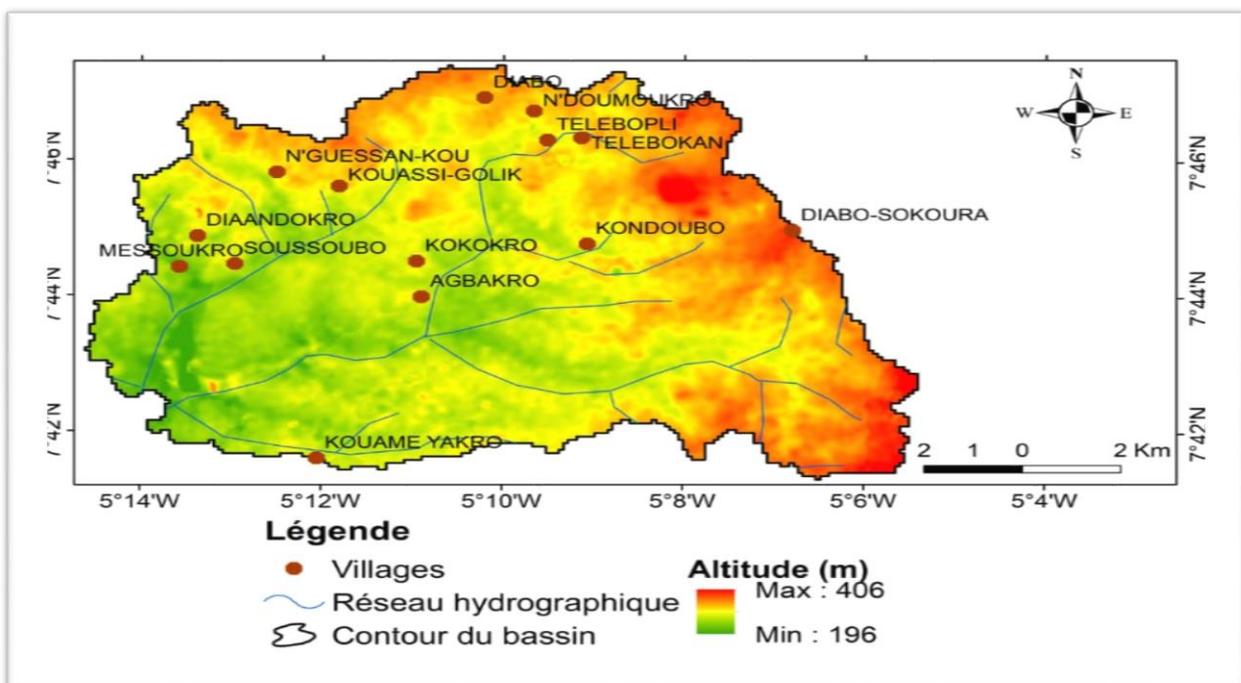


Figure 4 : Cartographie des altitudes du bassin de la Loka

1.1.5 Végétation

Le bassin versant de la Loka fait partie des zones de transition forêt-savane appelées communément zones pré-forestières. Ces zones sont marquées par une végétation de savane herbeuse et arborée (Kouamé, 2012). Le bassin versant de la Loka est principalement dominé par la savane arbustive.

1.1.6 Géologie et pédologique

Le sol du bassin versant de la Loka est une transition entre les sols ferrugineux des savanes et les sols ferrallitiques des forêts. Le bassin versant de la Loka est dominé par un sol de type ferrugineux avec un recouvrement sableux (Kouamé, 2013).

1.1.7 Démographique

La ville de Bouaké est la deuxième grande ville de la Côte d'Ivoire. Sa population était estimée à 536 719 habitants en 2014 selon le recensement générale de la population et de l'habitat (INS, 2014) alors qu'en 1998, elle était estimée à 461 617 habitants. Ainsi la ville de Bouaké enregistre un taux de croissance annuelle de 0,95 % (Tableau I).

Tableau I : Évolution démographique de la ville de Bouaké

	1975	1988	1998	2014
Population urbaine	173 248	332 999	461 617	536 719
Taux d'accroissement (%)	7,4	5,15	3,32	0,95
Population départementale	267 361	453 074	612 791	680 694
Taux d'accroissement (%)	2,91	4,14	3,07	0,66

1.2 Contexte de l'étude

1.2.1 Approvisionnement en eau potable de la ville de Bouaké

L'alimentation en eau potable de la ville de Bouaké est assurée par les eaux de surface et les eaux souterraines. Les eaux de surface comptent 80 % de la production d'eau potable de la ville et sont issues des retenues réalisées sur le bassin versant du Bandama. Ces retenues, au nombre de trois, sont : la retenue du Kan, la retenue de Gonfreville et celle de la Loka. Le barrage de la Loka est celui qui fournit les trois quarts de la production d'eau potable de la ville de Bouaké et de quelques localités environnantes. Utilisé en majeure partie pour l'alimentation en eau et la pêche, le barrage de la Loka a connu en 2018 un assèchement brusque pendant les mois de Mai, Juin et Juillet (Figure 5).



Figure 5 : Assèchement du barrage de la Loka de Bouaké

La Société de Distribution d'Eau potable de Côte d'Ivoire (SODECI) était face à une incapacité de satisfaire les besoins en eau des populations. Cela a conduit à des pénuries d'eau prolongées dans la ville de Bouaké. Ainsi pour leurs besoins en eaux, les populations en majorité utilisaient les eaux de puits, et de pluie sans un traitement préalable et aux eaux de forage dont la qualité est méconnue (Figure 6).



Figure 6 : File d'attente pour un ravitaillement en eau potable

1.2.2 Variabilité climatique

1.2.2.1 Définition de la variabilité climatique

La variabilité climatique désigne une transformation à court terme du climat d'un lieu donné. Une mesure de cette transformation est la modification que subissent les paramètres climatiques tels que la température, la pluviométrie, le vent et l'humidité de l'air. Pour la GIEC, la variabilité climatique est la modification des paramètres climatiques due à des causes naturelles, astronomiques et géophysiques (GIEC, 2008).

1.2.2.2 Caractérisation de la variabilité climatique

La variabilité climatique est caractérisée par une irrégularité des paramètres climatiques (température, pluie) dans leurs évolutions. Ces trois dernières décennies, la zone Ouest Africaine a connu une baisse importante de la pluviométrie. En effet, la période d'apparition des ruptures dans les séries pluviométriques est observée autour des années 1968 à 1972, précisément l'année 1970 comme année charnière (Madiodio, 2004). De même, des études effectuées sur la variabilité climatique en Afrique de l'ouest ont aussi montré qu'elle était caractérisée par une alternance de périodes sèches et humides. En Côte d'Ivoire, la variabilité climatique s'est également traduite par une alternance de phases sèches et humides qui a engendré l'apparition de ruptures dans les séries pluviométriques mesurées dans le pays. Ces

ruptures ont entraîné des déficits pluviométriques qui varient de 10 % à 30 % (Servat *et al.*, 1998 ; Goula *et al.*, 2006 ; Goula *et al.*, 2009). Cependant la variabilité climatique n'est pas seulement marquée par la baisse de la pluviométrie mais aussi par la présence des précipitations de forte intensité causant souvent des inondations.

1.2.2.3 Conséquences de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, la longue période de déficit pluviométrique (1970-2000) a eu un effet prononcé sur les écoulements et les réserves. En effet, le déficit a entraîné une baisse des écoulements atteignant parfois 50 % (Goula *et al.*, 2009). Un tarissement des cascades et des réservoirs a été observé respectivement dans la région montagneuse de l'Ouest, et dans la ville de Niakaradougou. Un déficit de 36 % au niveau du Sassandra a été observé à la station hydrométrique de Semien (Servat *et al.*, 1998). Cette baisse a aussi entraîné une réduction des réserves d'eau mobilisées dans les nappes phréatiques (Savané *et al.*, 2001) et une augmentation générale de la température de l'air dans le bassin versant du Bandama (Kouassi *et al.*, 2010) conduisant ainsi à une intensification de l'évaporation au-dessus des retenues dans le bassin versant.

1.3 Évaluation des ressources en eau

Le bilan hydrologique est une évaluation des quantités d'eau qui contribuent aux différentes étapes du cycle de l'eau : la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface et l'infiltration, qui se distribue entre le ruissellement hypodermique et la recharge. Il est basé sur l'équation 1 qui s'établit comme suit :

$$P = R + I + ET_R + \Delta S \quad (\text{Éq.1})$$

Avec

P : précipitations (mm)

ET_R : évapotranspiration réelle (mm)

R : écoulement de surface (mm)

I : infiltration profonde ou recharge (mm)

ΔS : variation du stock d'eau dans le sol

La quantité de certains paramètres du bilan hydrologique dans le temps requiert l'usage d'outils de pointe. Parmi ceux-ci figure la modélisation.

1.4 Modélisation

1.4.1 Définition

Un modèle est une représentation sous une forme quelconque simplifiée d'un objet, d'un processus ou d'un système relativement abstrait en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir (Koua, 2014). Il existe une multitude de modèle selon le domaine d'étude appliqué. En hydrologique, la modélisation est une représentation mathématique simplifiée de toute ou d'une partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques (Neitsch *et al.*, 2005). C'est un outil qui permet de représenter sous une forme simplifiée les phénomènes naturels du cycle de l'eau sur un bassin versant (Laborde & Morel, 1991). Le modèle explique aussi la réponse du bassin face aux influences climatiques et aux scénarii. Il simule les phénomènes hydrologiques observés ou les scénarii de planification, pour faire des prévisions et proposer des méthodes d'adaptation en s'appuyant sur les paramètres du bassin versant. Les modèles hydrologiques ont en générale une fonction de recherche car ils permettent :

- de réaliser des prédictions sur le comportement des systèmes (bassin versant, ou ouvrage hydraulique ou formation géologique etc.) considérés en réponse à des sollicitations considérées ;
- d'évaluer des prévisions (crues, sécheresse, gestion d'irrigation, d'ouvrages hydroélectriques, recharge d'aquifères) ;
- de prévenir l'impact des infrastructures sur la qualité et la quantité de la ressource ;
- d'estimer l'évolution socio-économique des activités afin d'anticiper les aspects néfastes.

1.4.2 Modèle SWAT

SWAT est l'acronyme de « Soil and Water Assessment Tool ». C'est un modèle déterministe, physique, conceptuel, semi-distribué qui fonctionne sur une base continue avec un pas de temps journalier. SWAT est un outil d'évaluation des bassins versants fluviaux, il a été développé par des chercheurs du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) (Arnold *et al.*, 1993). Il manipule et analyse de nombreuses données agro-hydrologiques. Lorsque le modèle est mis en place sur un bassin versant, il permet de simuler les transferts de nutriments, de sédiments et de pesticides vers le réseau de drainage et les aquifères. Le modèle offre aussi des avantages au niveau de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Il permet d'évaluer la quantité (domaine hydrologie) et la qualité (pollution, eutrophisation) des ressources en eaux. Aussi réalise-t-il des prévisions climatiques (pluie, température etc.) des eaux souterraines ainsi que des eaux de surface. Les avantages du modèle SWAT sont multiples et variés. Il permet de :

- connaître le fonctionnement d'un bassin versant ;
- estimer les risques d'inondations et d'étiages ;
- évaluer les débits sur des cours d'eau non jaugés ;
- simuler l'impact de scénarios d'aménagement ;
- modéliser le transfert de polluants ;
- réaliser des prévisions climatiques (pluie, température et neige).

Le choix porté sur le modèle SWAT pour la réalisation de cette étude, est dû à sa capacité aisée à reproduire de manière simplifiée le cycle de l'eau sur les bassins versants fortement anthropisés. Ce choix est dû aussi à sa faculté à intégrer de manière précise l'ensemble des activités se déroulant sur le bassin versant dans le scénario hydrologique. Il rend compte des apports des polluants, des sédiments, et des débits ruisselés en se basant sur l'occupation du sol, la topographique, la pédologie et les paramètres climatiques. C'est en cela qu'il permet de cerner l'évolution des réservoirs face à leur qualité et à leur quantité (aquifère, barrage etc.). Ainsi, le modèle SWAT montre qu'il est un outil d'aide à la décision pertinent. La modélisation de certains bassins versants en Afrique à l'aide Soil Water Assessment Tool (SWAT) a prouvé qu'il est un modèle capable de gérer efficacement les problèmes agro-hydrologique et les problèmes liés à la gestion des ressources en eau sous nos cieux. Nous pouvons citer en autres la modélisation des meilleures pratiques culturales faite sur le bassin de Taabo par Anoh (2014) et celle des problèmes liés à la pollution diffuse en milieu agricole et des effets du changement climatique sur le bassin du lac de Buyo par Koua (2014). Il a été aussi utilisé au Mali pour la modélisation des impacts du changement climatique sur le régime hydrologique du fleuve Bani réalisé par Thiebault (2010).

1.4.2.1 Fonctionnement du modèle SWAT

Dans le but de simplifier la réalité, SWAT dans son fonctionnement divise en deux phases la modélisation hydrologique du bassin (Neitsch *et al.*, 2005). La première phase correspond à la phase terrestre du cycle hydrologique et la seconde, à la phase de transfert.

- Phase terrestre

Dans la phase terrestre, SWAT restitue les équations du cycle de l'eau. Il discrétise le bassin versant du modèle en sous bassin. À l'intérieur de chaque sous bassin une combinaison unique d'occupation du territoire, de pratique culturale, de types et propriétés de sols forment des unités homogènes de calculs appelées Unités de Réponse Hydrologique (URH). À l'intérieur des URHs, SWAT reproduit le cycle de l'eau en s'appuyant sur la précipitation,

Généralités

l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement sub-surface ou latéral et l'écoulement souterrain. SWAT intègre cela à l'ensemble du bassin et permet d'établir les termes du bilan hydrologique du bassin versant à travers l'équation 2 :

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} + Q_{surf} + E_a + W_{seep} + Q_{gw}) \quad (\text{Éq.2})$$

Avec

SW_t : quantité finale d'eau dans le sol (mm) ;

SW_0 : quantité initiale d'eau dans le sol par jour (mm) ;

R_{day} : précipitation totale journalière (mm) ;

Q_{surf} : ruissellement total de surface journalière (mm) ;

E_a : évapotranspiration totale journalière (mm) ;

W_{seep} : quantité journalière d'eau entrant dans la zone vadose à partir du profil du sol (mm) ;

Q_{gw} : quantité d'eau retournant dans le sol (mm).

SWAT offre plusieurs formules de calculs de l'ETP. Selon les données disponibles, le modèle SWAT propose trois options (Équation 4, 5 et 6) pour calculer l'évapotranspiration potentielle (Biesbrouck *et al.*, 2002).

Équation de Penman-Monteith :

$$\lambda E_0 = (\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times C_p \times [(e_z^0 - e_z] / ra)) / (\Delta + \gamma \times (1 + (rc/ra))) \quad (\text{Éq.3})$$

Équation de Priestley-Taylor

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \times (\Delta / (\Delta + \gamma)) \times (H_{net} - G) \quad (\text{Éq.4})$$

Équation Hargreaves

$$\lambda E_0 = 0,0023 \times H_0 \times (T_{mx} - T_{mn})^{0,5} \times (\bar{T}_{av} + 17,8) \quad (\text{Éq.5})$$

Avec,

λ : densité du flux de la chaleur latente de vaporisation (MJ/m².j) ;

E_0 : évaporation transpiration potentielle (ETP) (mm/j) ;

Δ : pente de la courbe température- pression de vapeur saturante (kPa/°C) ;

Généralités

H_{net} : rayonnement net ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{j}$) ;

G : flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{j}$) ;

ρ_{air} : masse volumique de l'air (kg/m^3) ;

C_p : chaleur spécifique à pression constante ($\text{MJ}/\text{kg}.\text{°C}$) ;

γ : constante psychrométrique ($\text{kPa}.\text{°C}$) ;

e_z^0 : facteur de saturation de la pression de vapeur de l'air à la hauteur z (kPa) ;

e_z : pression de vapeur de l'air à la hauteur z (kPa) ;

rc : résistance du feuillage de la plante (s/m) ;

H_0 : correspond au rayonnement incident ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{j}$) ;

$\rho_{air,}$: coefficient ;

ra : résistance de la diffusion de l'air (résistance aérodynamique) ;

T_{mx} , T_{mn} et \bar{T}_{av} , les températures maximale, minimale et moyenne du jour (°C).

L'utilisation de l'une de ces méthodes dans SWAT est fonction des données disponibles.

- Phase de transfert

Dans la phase de transfert ou phase aquatique ou phase de routage, SWAT détermine les charges des nutriments, des sédiments, des bactéries et les différentes transformations qu'ils ont subi dès leurs entrées dans le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire du bassin versant. La particularité avec SWAT, est qu'une fois les débits d'eaux déterminés, il arrive à quantifier les apports susceptibles d'être emportés par la force du flux ruisselant. Il intègre dans sa phase terrestre, une équation Universelle de Perte de Sol en abrégé USLE pour le calcul de l'érosion de sol du milieu. Alors avec la puissance du flux ruisselant entraînant les sédiments soit par charriage, par suspension ou saltation, les sédiments emportent avec elle des nutriments et des polluants dans le barrage. SWAT détermine ainsi la charge des nutriments et polluants déversée à l'exutoire du bassin versant.

1.4.2.2 Évaluation de la performance du modèle SWAT

1.4.2.2.1 Analyse de sensibilité et d'incertitude du modèle

L'analyse de sensibilité et d'incertitude est l'identification des changements des variables de sortie en fonction des changements des paramètres du modèle (Roukia, 2019). Elle permet d'identifier les paramètres qui influencent la performance du modèle. Elle permet aussi de spécifier le nombre de paramètre à introduire lors de la calibration du modèle. L'analyse de sensibilité acquiesce de connaître les paramètres sensibles au modèle et de limiter le nombre de paramètre permettant d'optimiser l'obtention d'une bonne adéquation entre les données simulées et observées. SWAT est un modèle fortement paramétré. En effet, il inclut 629 paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour avoir une performance du modèle. Lors de la mise en place du modèle, plusieurs incertitudes peuvent réduire la performance du modèle. Ainsi, l'analyse des incertitudes permet de quantifier ces lacunes. Elle est évaluée statistiquement par deux variables que sont :

- P-facteur : représente le degré pour lequel toutes les incertitudes sont représentées c'est le pourcentage des données mesurées encadrées par 95 % de prédiction d'incertitude (95PPU).
- R-facteur est l'épaisseur de la bande 95 PPU.

1.4.2.2.2 Fonction objective

La fonction objective est un indicateur de la performance du modèle. Elle permet de mieux apprécier la différence entre les valeurs observées et simulées. Elle peut être unique ou multiple. L'algorithme SUFI2 de SWATCUP propose 7 fonctions-objectifs qui peuvent être utilisés. Elles se composent du coefficient de Nash-Sutcliffe « NS », des coefficients de détermination « R^2 », « SSQR », « br2 » et « Chi2 », de la somme « Sum », de la multiplication « Mult » et de l'erreur au carré. Les multifonctions objectives que sont le coefficient de NS et de détermination R^2 précise plus l'efficacité du modèle quant aux respects des volumes écoulés et des écarts absolus (Biotteau *et al.*, 2002).

1.4.2.2.3 Calibration et validation du modèle

Le calage du modèle peut se faire manuellement, automatiquement ou une combinaison des deux. La calibration manuelle demande énormément d'effort, une expertise assez poussée et une connaissance développée du bassin versant. Alors que le calage automatique implique l'utilisation d'un algorithme de recherche pour la détermination des paramètres les mieux adaptés. Quant à la calibration combinée comme son nom l'indique, elle fait intervenir les deux

Généralités

méthodes de calibration. La validation suit le même principe que la calibration ; seulement ici, il s'agit de considérer une autre période différente de celle de la calibration. Elle permet d'apprécier la robustesse du modèle.

PARTIE 2 :
MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Matériel

2.1.1 Données

2.1.1.1 Données climatiques

Deux types de données ont été utilisés. Les données climatiques utilisées pour l'étude de la variabilité climatique sont les données de pluies et de températures au pas de temps mensuel. Ces données sont issues de la station pluviométrique de Bouaké et ont été octroyées par la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Elles couvrent les périodes de 1971 à 2006. Pour la modélisation agro-hydrologique requérant des données climatiques journalières, une base de données climatique composée de pluie, de température, d'humidité relative, de la vitesse du vent ont été obtenues sur le site web du modèle SWAT (<http://SWAT.tamu.edu>). Ces données ont été utilisées à une correction et couvrent les périodes de 1980 à 2006.

2.1.1.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques ont été obtenues auprès de la Sous-Direction de l'hydrologie, de la Direction Territoriale de l'Hydraulique. Le bassin versant de la Loka n'est pas jaugé, les débits utilisés sont ceux de la station hydrométrique de Marabadiassa. Elle se trouve en amont du bassin versant de la Loka. Les débits utilisés couvrent les périodes de 1980 à 2006 et sont au pas de temps mensuel.

2.1.1.3 Données morphologique

Les données obtenues auprès de la SODECI sont les données physiques du réservoir et les volumes d'eau prélevés dans le réservoir. Les données physiques concernent la date de mise en marche du barrage et les dimensions du barrage qui sont la hauteur d'eau normale, le volume du réservoir, la surface du réservoir, la surface du déversoir. Ces données physiques sont utiles pour la modélisation agro-hydrologique lors de l'intégration du barrage dans le modèle. Pour les volumes d'eau prélevés, ils sont utiles pour l'étude de l'adéquation disponibilité-besoin en eau. Ils sont disponibles au pas de temps mensuel et couvrent la période 1987 à 2019.

2.1.1.4 Données spatiales

Les données spatiales utilisées pour la mise en place du modèle sont :

- ✓ une carte pédologique de la zone d'étude extrait de celle de la Côte d'Ivoire établie par la FAO pour la détermination des débits de sédiments entrant dans le réservoir. Elle prend en compte 5 000 types de sols avec une résolution de 10 km.

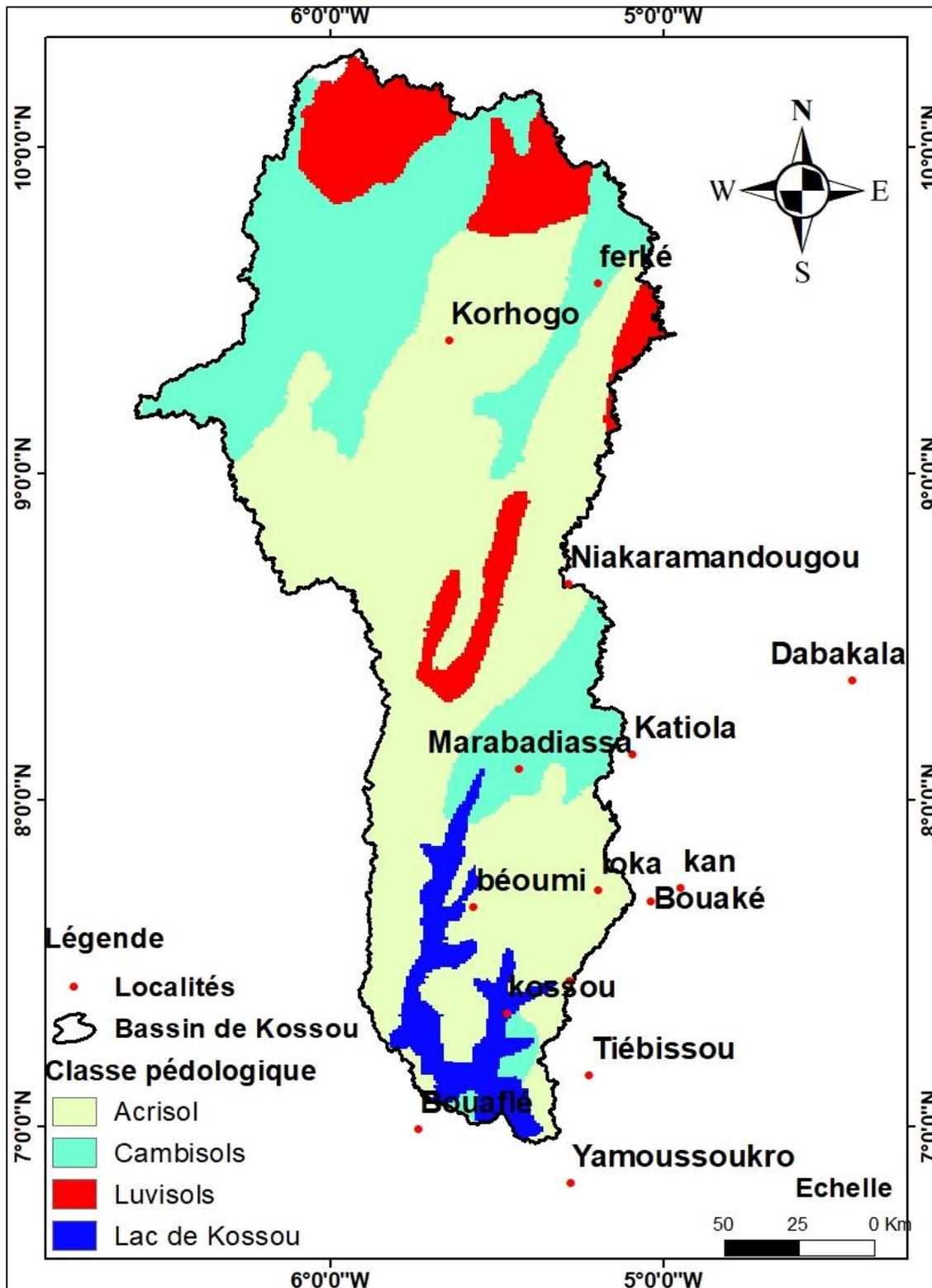


Figure 7: Carte pédologique du bassin versant du lac de Kossou

- ✓ un modèle numérique d'altitude (MNA) d'une résolution de 30 m acquis gratuitement via le site américain «<http://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version4/SRTM3/Africa>» ;

- ✓ une carte de l'occupation du sol de l'année 2006, elle a été prise dans les travaux de recherche de Anoh (2014). Pour la délimitation de la carte d'occupation du sol nous avons pris pour exutoire le lac de Kossou.

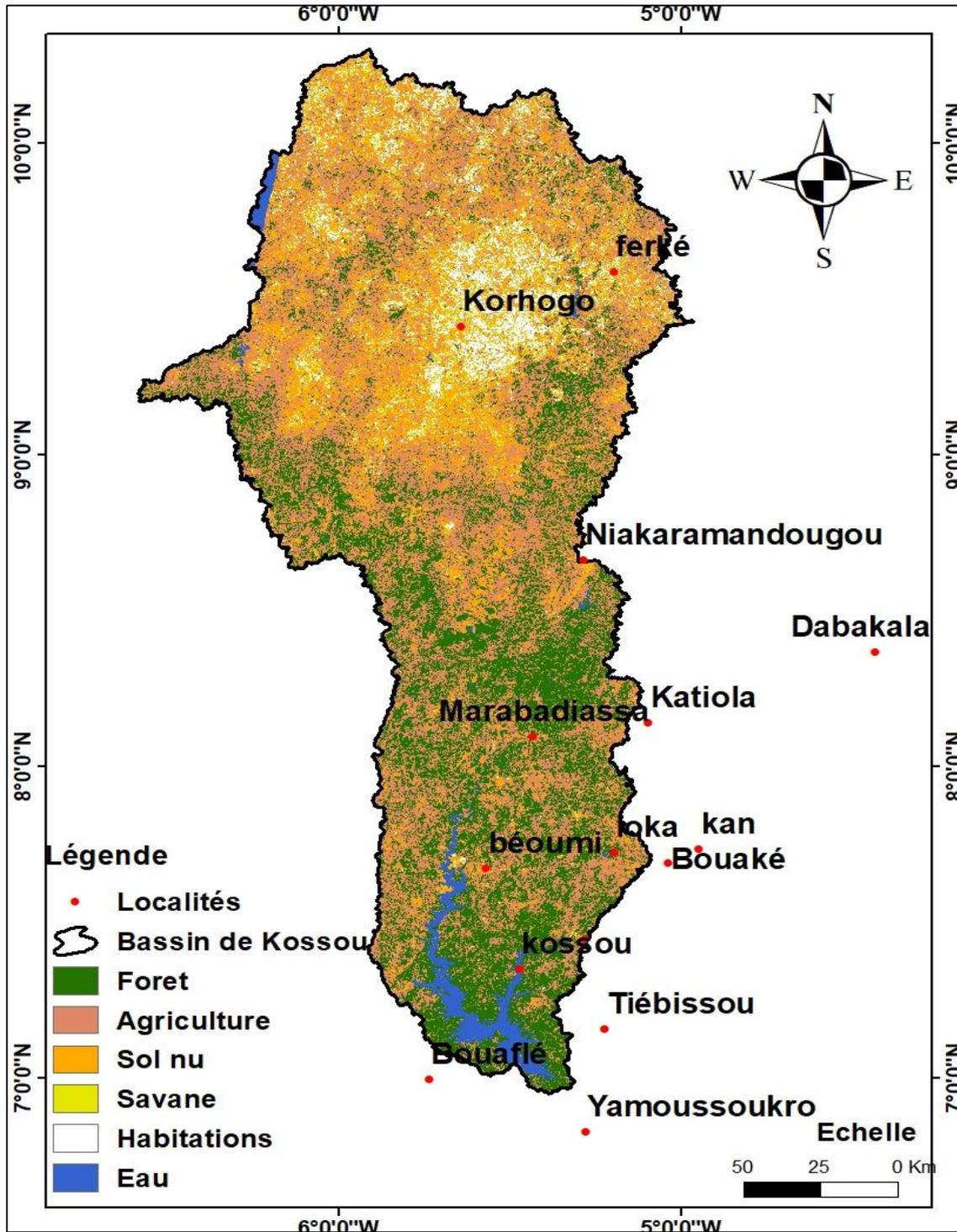


Figure 8 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du lac de Kossou

2.1.2 Logiciels

Pour la réalisation de cette étude, plusieurs logiciels ont été utilisés. Ce sont :

- le logiciel ArcGIS pour la cartographie et le support du modèle SWAT ;
- le logiciel Envi exclusivement utilisé pour l'établissement de la carte d'occupation du Sol ;
- la version 2009 du modèle SWAT et l'algorithme SUFI-2 du logiciel SWAT-CUP pour la modélisation agro-hydrologique ;
- les programmes WGN et dew02 pour l'adaptation des données climatiques au milieu tropicale humide ;
- le tableur Excel pour le traitement statistique des données.

2.2 Méthodes

2.2.1 Étude de la variabilité climatique par l'analyse des indices de Nicholson

L'analyse des indices de Nicholson porte sur la variable centrée réduite (rapport de l'écart à la moyenne sur l'écart type) ou l'indice de Nicholson des totaux pluviométriques (Nicholson, 1980). Il permet d'identifier les périodes excédentaires ou déficitaires pluviométriques à l'échelle interannuelle. Il obéit à l'équation 8 suivante :

$$X = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (\text{Éq.8})$$

Avec :

X : indice de Nicholson

σ : écart type de la série ;

x_i : pluviométrie de l'année i ;

\bar{x} : pluviométrie moyenne de la série.

2.2.2 Quantification des flux d'eau de la retenue de la Loka

La mise en place du projet de modélisation agro-hydrologique se fait en trois phases qui sont : le prétraitement, le traitement et le post-traitement.

2.2.2.1 Prétraitement

Le prétraitement consiste à modifier et/ou ajuster certains aspects du code source du modèle en vue d'une adaptation aux conditions locales.

2.2.2.2 Traitement

En absence de données hydrométriques sur le bassin versant de la Loka, celui-ci a été considéré comme un sous bassin versant dans le modèle. Dans cette optique, le bassin versant considéré est celui du bassin versant du Bandama avec pour exutoire le lac de Kossou. Sur ce bassin, figure une station hydrométrique (Marabadiassa).

2.2.2.2.1 Délimitation du bassin versant et de ses sous bassins versants.

L'extension ArcSWAT du logiciel ArcGIS délimite de façon automatique le bassin versant en utilisant un Modèle Numérique d'Altitude (MNA). Toutefois, une correction est apportée au MNA. Cette correction a consisté à combler les valeurs aberrantes (puits, point très bas) afin d'éviter que ses valeurs influencent le sens de l'écoulement. Ainsi la modélisation commence par :

- **une extraction du réseau hydrographique** : le modèle délimite la direction des écoulements et leur point d'accumulations. Cependant un seuil d'apparition des écoulements est établi. Ce seuil de l'air des sous bassins dans notre étude a été fixé à 200 km².
- **une définition des exutoires** : le modèle utilise les points d'intersection des écoulements à travers l'ordre de Strehler pour définir un exutoire. Puis, à ces différents exutoires, il réalise une délimitation automatique de chaque sous bassins versant. Dans le bassin versant de Kossou, 263 sous bassins versant ont été délimité. Après cette délimitation, le modèle permet l'intégration des paramètres morphométriques du réservoir aux différents sous bassins créés. Ainsi, nous avons intégré les paramètres du réservoir de la retenue de la Loka aux paramètres du modèle.
- **une délimitation du bassin versant** : le modèle requière un exutoire pour la délimitation du bassin versant. Celui-ci peut-être un exutoire de sous bassin versant ou un point dans un sous bassin versant. Dans notre cas, l'exutoire est le lac de Kossou.

2.2.2.2.2 Définition des unités de réponse hydrologiques (URH)

Les URHs sont les unités spatiales de base utilisées pour les calculs du modèle SWAT. Elles sont le résultat de la combinaison de trois éléments que sont la pente, la pédologie et le type d'occupation du sol dans les sous bassins précédemment délimités. L'intersection de ces différents éléments dans un sous bassin définit une URH. Une fois l'URH définie, le modèle passe à la distribution des URHs. Le modèle offre plusieurs choix de distribution des URH dans

un sous bassin. Il peut être unique, dominant ou multiple dans le sous bassin. Dans cette étude, nous avons utilisé l'option dominant qui a beaucoup été utilisée par Anoh *et al.*, (2017, 2018).

2.2.2.2.3 Importation de données climatiques

La chronique des données climatiques choisie pour la modélisation a été dépendante de la chronique des données de débits disponible. La chronique des données de pluie, de température, d'humidité relative, d'insolation et de vitesse du vent couvre la période de 1979 à 2006. Leur disposition selon la date est inscrite dans le système anglophone.

2.2.2.2.4 Création des tables d'entrée par le modèle

La création des tables d'entrée par le modèle est un assemblage des différents fichiers. Il s'agit des fichiers à caractéristique physico-chimiques, des fichiers URHs, de chenaux d'écoulements, des sols et de la météorologie. Cet assemblage fait ressortir une table incluant les informations pour générer les entrées par défaut dans SWAT alors une mise à jour de cette table a été faite. Une fois la mise à jour du modèle réalisé, SWAT estime les paramètres par défaut. Pour le ruissèlement, il procède par une modification de la méthode SCS (Soil Conservation Service) ou par la méthode d'infiltration de Green et Ampt. Quant à l'évapotranspiration potentielle, SWAT a en son sein quatre équations intégrées pour son calcul. Alors, il offre le choix de calcul soit par la méthode de Penman-Monteith, ou par la méthode de Priestley-Taylor ou celle de Hargreaves. Dans tous les cas, le choix de l'une de ces méthodes est dicté par la disponibilité des données. Dans notre étude, la méthode utilisant les cinq paramètres climatiques de SWAT (Penman-Monteith) a été utilisée.

2.2.2.2.5 Simulation

La simulation consiste principalement à tester la mise en marche du modèle et à définir le nombre d'années de mise en route. Aussi, permet-elle de configurer les conditions aux limites des différentes simulations afin de préciser au modèle la barre ou l'intervalle d'année dans lequel sont comprises les données. Elle dicte aussi au modèle les pas de temps dans lesquels sont disposées les données. Le choix de la distribution spatiale des données climatique dans cette étude est porté sur une discrétisation asymétrique. La simulation définit aussi les pas de temps dans lesquels seront restitués les résultats. Suivant la chronologie des données observées, le modèle offre le choix entre les pas de temps horaire, journalier, mensuel ou annuel pour les simulations. Puisque les données couvrent une longue période et afin de réduire la durée des simulations due à la longueur des données, la restitution des résultats s'est faite au pas de temps mensuels.

2.2.2.3 Post-traitement

Le logiciel SWAT-CUP est un ensemble de procédure de calibration, de validation et d'analyse de sensibilité et d'incertitude. Il permet de rendre plus aisé la calibration du modèle SWAT. Pour ce faire, il présente cinq algorithmes ou approches que sont PSO, SUFI 2, MCMC, GLUE et ParaSol. Parmi ces différentes approches la plus aisée à manier est le SUFI2, car elle offre une plage de paramètre plus grande (Roukia, 2019).

2.2.2.3.1 Analyse de sensibilité du modèle

Le modèle SWAT présente 629 paramètres à introduire pour obtenir une bonne performance du modèle. Dans cette étude, nous nous sommes basés sur les paramètres qui ont été jugés sensibles dans les travaux de Anoh (2014). Ces travaux d'études ont été menés sur le bassin versant de Taabo. Or le bassin de Kossou (Bandama) est inscrit dans celui de Taabo. Alors les paramètres jugés sensible au modèle de Taabo ont été les paramètres sur lesquels se sont basés cette analyse de sensibilité. Ces paramètres sont au nombre de 14 (Tableau III). Ces indices sont déterminés à partir d'une fonction de régression multiple. Chacun des paramètres testés y est régressé par rapport à la fonction objective utilisée en calibration avec la méthode d'échantillonnage par hypercube latin en supposant une hypothèse nulle.

Tableau II : Paramètres du modèle

	Paramètres	Descriptions	Fichier
1	CN2	Numéro de courbe du SCS	.Mgt
2	SOL_AWC	SOL_AWC Disponibilité en eau dans les couches de sol.	.Sol
3	ALPHA_BF	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine.	.Gw
4	CH_N1	Coefficient de rugosité de Manning des chenaux secondaires.	.Sub
5	CH_K1	Conductivité hydraulique effective des chenaux secondaires	.Sub
6	CH_K2	Conductivité hydraulique effective des chenaux principaux	.Rte
7	GWQMN	Seuil de contribution de l'aquifère peu profond à l'écoulement en chenal (écoulement de base).	.Gw

Matériel et Méthodes

8	CH_N2	Coefficient de rugosité de Manning des chenaux principaux	.Rte
9	ESCO	Facteur de compensation de l'évapotranspiration du sol	.Hru
10	GW_DELAY	Délai pour que l'eau souterraine qui transite par la nappe superficielle atteigne le cours d'eau	.Gw
11	RCHRG_DP	Coefficient de percolation de l'aquifère profond	.Gw
12	EPCO	Facteur de compensation de l'évapotranspiration pour le prélèvement des plantes	.Hru
13	NPERCO	Coefficient de percolation de l'azote	.Bsn
14	ERORGN	Taux d'enrichissement des sédiments en azote	.Hru

Rte : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques physiques du cours d'eau ;

Gw : fichier qui englobe les paramètres représentant les caractéristiques de l'aquifère souterraine ;

Bsn : fichier qui définit les attributs généraux du bassin ;

Hru : fichier relatif à l'unité de réponse hydrologique.

2.2.2.3.2 Évaluation de la performance du modèle

✓ Analyse des incertitudes

L'analyse des incertitudes est basée sur les paramètres décideurs ou comparatifs décrivant l'incertitude régnant entre les données observées et celles simulées. Alors les paramètres sur lesquels repose la visualisation des incertitudes sont :

- Les 95PPU « 95 pourcents de prédiction d'incertitude » est calculé aux niveaux de 2,5 et 97,5 % de la distribution cumulative d'une variable de sortie obtenue par échantillonnage de Latin Hypercube (LH), refusant 5 % des simulations très mauvaises. Il suppose que les incertitudes des paramètres d'entrées ont une distribution uniforme et celles de la sortie du modèle peut avoir jusqu'à 95 % d'incertitude.
- P-facteur est le pourcentage d'observation ou d'apparition des couverts par le 95PPU ;
- R-facteur est l'épaisseur de la bande 95PPU

Le R-facteur et le P-facteur permettent de quantifier les incertitudes prises en compte par l'algorithme SUFI2. Lorsque le P-facteur tend vers 1 soit de 80 % à 100 % et le R-facteur tend vers 0, cela signifie que les valeurs simulées sont significativement égales aux valeurs observées.

✓ Fonction objectives

Les fonctions objectives utilisées pour évaluer la performance de notre modèle sont le critère de Nash (NS) et le coefficient de détermination (R^2). Ces critères ont été retenus car ils représentent mieux la performance du modèle. D'ailleurs, ils sont les plus utilisés dans la plupart des études de modélisation. Ils se définissent comme suite :

- coefficient de Nash Sutcliffe (NS) : indique à quel point la variation des observations correspondent à la variation des valeurs simulées. Il obéit à cette équation 6 :

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1} (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (\text{Éq.6})$$

Ce coefficient est inférieur ou égale à 1, avec 1 comme valeur optimale qui traduit la superposition des données simulées et observées. Lorsque la valeur de Nash est supérieure à 0,5, les résultats obtenus sont considérés satisfaisants (Arnold *et al.*, 2012).

- coefficient de détermination R^2 : représente la proportion de variance expliquée dans la variance totale des observations. Il obéit à l'équation 7 et sa valeur varie de 0 (modèle nul) à 1 (modèle parfait).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1} (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (\text{Éq.7})$$

2.2.2.3.3 Calibration et validation du modèle

La calibration a été lancée sur la période de 1979 à 1997. Quant à la validation du modèle, elle couvre la période de 2000 à 2006. Il faut mentionner que 2 simulations de 400 itérations ont été nécessaires pour calibrer le modèle. La validation a aussi utilisé les paramètres de la dernière simulation. Cette dernière contient aussi 400 itérations.

2.3 Évaluation de l'adéquation disponibilité-besoin en eau

2.3.1 Détermination des périodes Hydrologiques

Les périodes de hautes et basses eaux sont déterminées par le calcul du coefficient mensuel de débit (CMD). Ce coefficient est le rapport entre le débit moyen mensuel et le débit moyen annuel. Il s'obtient à partir de l'équation suivante :

$$CMD = \frac{Q_i}{Q_m} \quad (\text{Éq.10})$$

Avec

Q_i : débit moyen mensuel

i : rang de chacun des 12 mois dans l'année

Q_m : débit moyen annuel

Si $CMD \geq 1$, alors le mois correspond à une période de hautes eaux

Si $CMD < 1$, alors le mois correspond à une période de basses eaux

2.3.2 Adéquation disponibilité-besoin en eau

L'évaluation de l'adéquation entre disponibilité en eau et les besoins en eau est établit par une comparaison entre les demandes d'eau et la disponibilité d'eau. Cette disponibilité en eau est évaluée en déduisant du volume d'eau arrivant dans le réservoir, le volume d'eau perdue. Le volume d'eau perdue comprend le volume d'eau évaporée et celui infiltré. L'équation 11 résume la formule de calcul du volume d'eau réel dans la retenue.

$$V_{réel} = V_{re} - V_e - V_i \quad (\text{Éq.11})$$

Avec

$V_{réel}$: volume d'eau réel du réservoir

V_{re} : volume d'eau initiale dans le barrage

V_e : volume d'eau évaporé

V_i : volume d'eau infiltré

PARTIE 3 :
RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Caractérisation de la variabilité climatique par les indices de Nicholson

L'analyse de l'indice de Nicholson a permis d'identifier :

- une période excédentaire ou période humide de 1971 à 1986 ;
- une période déficitaire ou période sèche de 1987 à 2006.

Pendant la période excédentaire de 1971 à 1986 (Figure 9), la moyenne des hauteurs de pluies annuelles observées est de 1 990,6 mm et pendant la période déficitaire (1987 à 2006), la moyenne des hauteurs de pluies annuelles est de 1 770 mm soit une baisse de 11,08 % de la hauteur de pluie.

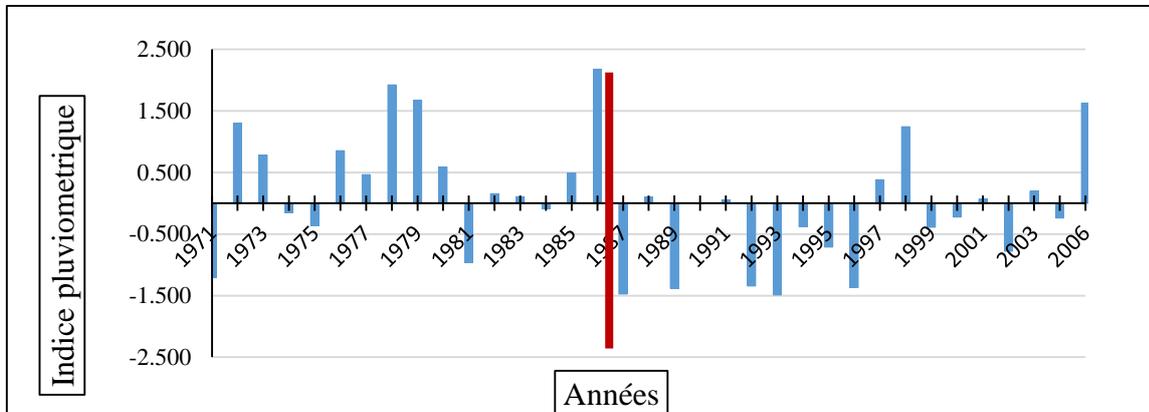


Figure 9 : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Bouaké

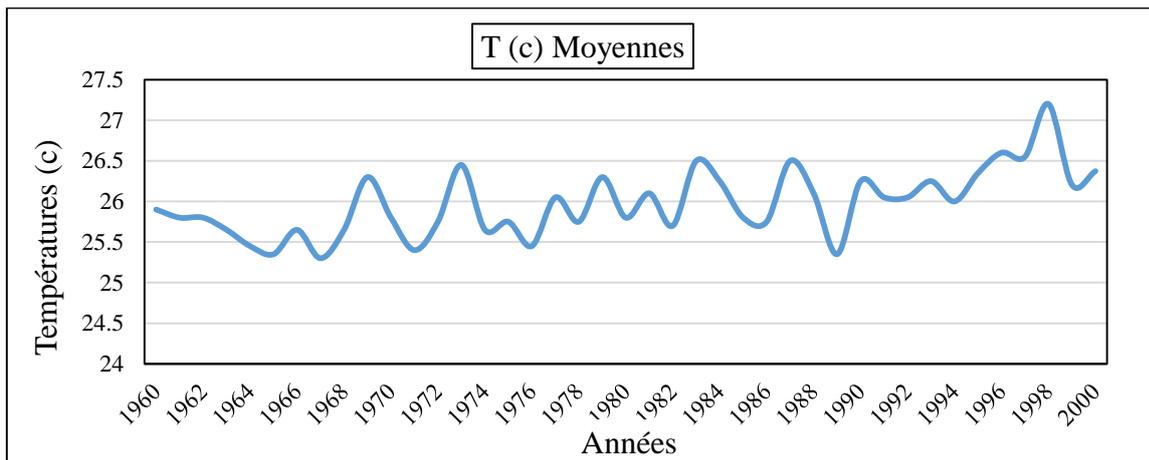


Figure 10 : Évolution de la température moyenne de 1960 – 2000

- La température moyenne de 1960 -1986 est de 25,81 (c)
- La température moyenne de 1987 - 2000 est de 26,37 (c)

Nous observons une augmentation de la température après la rupture de 1987

3.1.2. Résultat de la restitution des débits de la Loka à l'aide du modèle SWAT

3.1.2.1 Analyse de la simulation du modèle SWAT

L'analyse de sensibilité appliquée aux 14 paramètres a montré 10 paramètres sensibles à la simulation des débits de la station hydrométrique de Marabadiassa. Elles sont consignées dans le tableau V ci-dessous :

Tableau III : Paramètres sensibles au modèle SWAT

	PARAMETRES	Valeurs par défaut	Valeurs ajustées
1	R__CN2.mgt	0,6 à 0,3	0,130875
2	R__SOL_AWC (..).sol	0,3 à 0,4	0,287125
3	V__ALPHA_BF.gw	0,1	0,52375
4	V__GW_DELAY.gw	10,450	253,65000
5	V__GWQMN.gw	0,3	1,69875
6	V__GW_REVAP.gw	0 à 0,2	0,05375
7	V__ESCO.hru	0,1	0,87375
8	R__HRU_SLP.hru	0 à 0,2	0,17675
9	R__OV_N.hru	0,2 à 0	0,11325
10	R__SLSUBBSN.hru	0 à 0,2	0,07925

3.1.2.2 Résultat de la calibration du modèle SWAT

Le résultat de la calibration des débits a été obtenu en jouant sur les paramètres sensibles du modèle SWAT. Le résultat de calage (Figure 11) montre une similitude entre les débits observés et simulés.

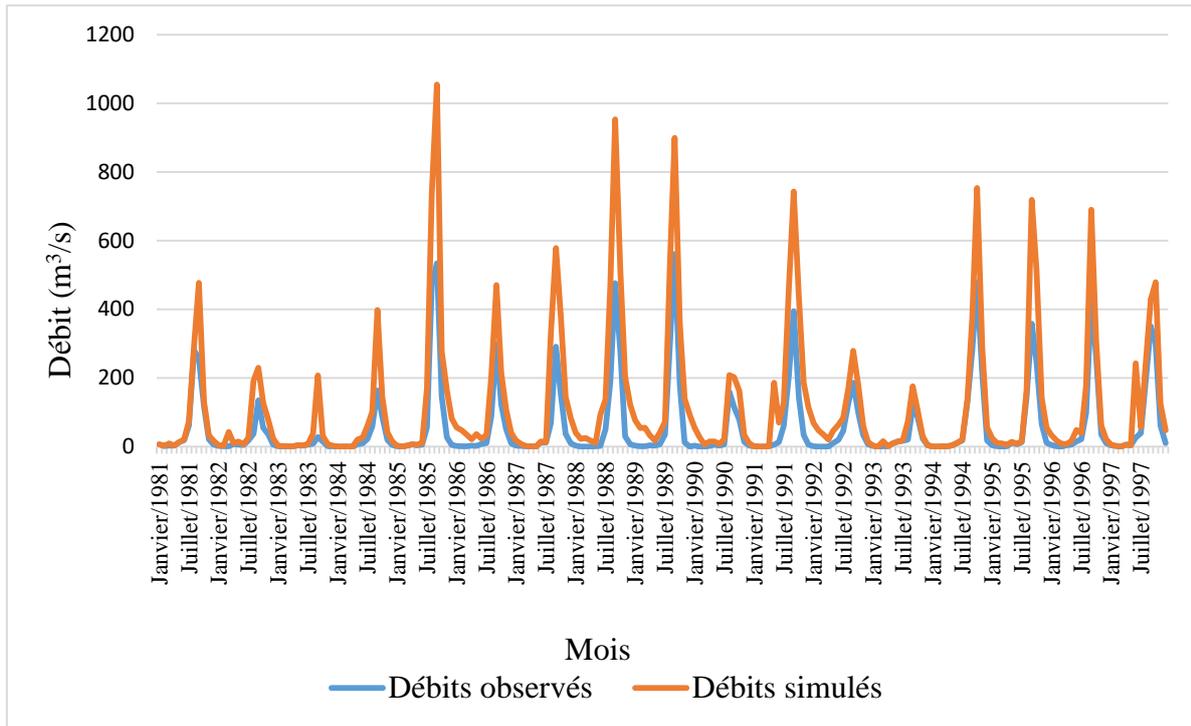


Figure 11 : Calibration du modèle SWAT à la station de Marabadiassa

L'évaluation de la performance de cette calibration à travers les paramètres sensibles identifiés, donne un coefficient de Nash égale à 0,66 et un coefficient de détermination égale à 0,66. Les valeurs des différents outils d'évaluation de la performance du modèle sont conciliées dans le tableau VI.

Tableau IV : Paramètres d'évaluation de la performance du modèle (1980-1997)

N° du sous bassin	P-facteur	R-facteur	R ²	Nash
197	0,79	1,02	0,66	0,66

3.1.2.3 Résultats de la validation du modèle SWAT

Les résultats de la validation du modèle de manière graphique (Figure 9) montrent un synchronisme entre les débits observés et les débits simulés. Toutefois, il y'a une surestimation des débits simulés durant les mois de Juillet à Novembre 2003.

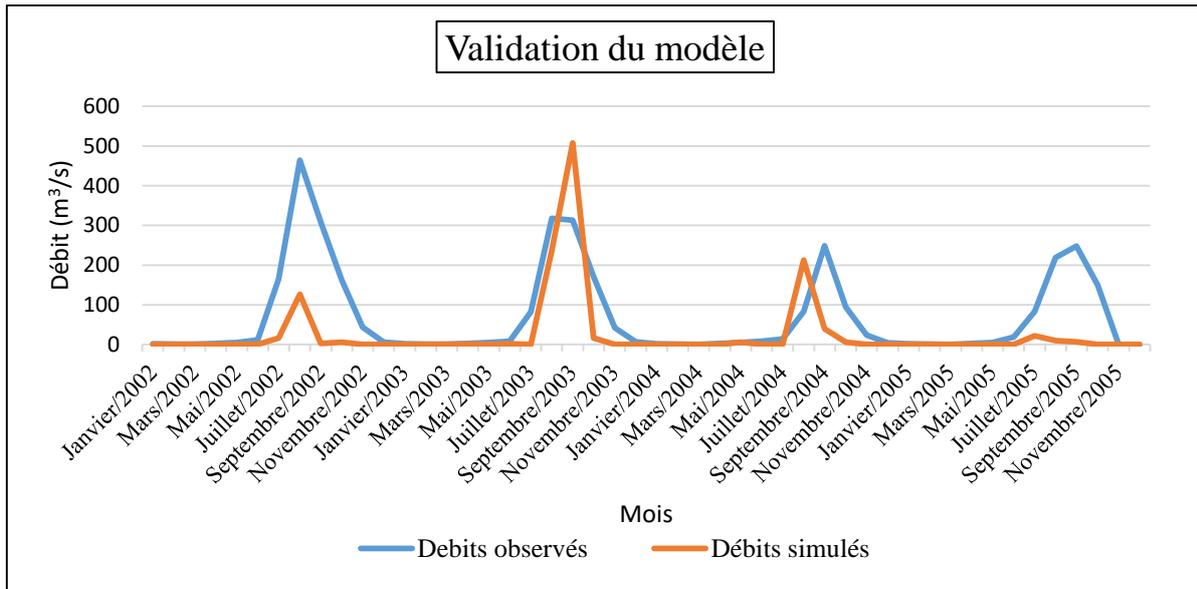


Figure 12 : Validation du modèle SWAT à la station de Marabadiassa

Le tableau VII montre les valeurs résultantes des différents outils d'évaluation de la performance du modèle lors de la validation. L'analyse statistique des résultats de la validation donne des valeurs satisfaisantes du P-facteur et R-facteur quant aux R^2 et Nash, leurs valeurs sont inférieures à 0,5.

Tableau V : Paramètres d'évaluation de la performance du modèle 2000-2006

Sous bassin	P-facteur	R-facteur	R^2	Nash
197	0,35	0,28	0,35	0,29

3.1.2.4 Présentation des flux d'eau dans le réservoir

Les flux d'eau entrant dans le réservoir ont permis d'obtenir le volume d'eau dans le réservoir, la charge de sédiment entrant dans le réservoir et la quantité d'eau évaporée au-dessus du réservoir de la Loka. Ces différents flux restitués couvrent la période de 1981 à 1997.

3.1.2.4.1 Débits d'eau entrant la retenue de la Loka

Les débits mensuel et annuel entrant dans le réservoir sont représentés respectivement par les figures 13 et 14.

- **Débits d'eau mensuels entrant dans le réservoir (1981 à 1997)**

Le débit d'eau moyen entrant dans la retenue chaque mois est de $0,78 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une lame d'eau de 15,30 mm chaque mois. À travers la figure 11, les débits d'eau mensuels entrant dans le

réservoir présentent la même allure que celle des précipitations. Ils oscillent entre 12,3 et 22,03 mm/mois. Les mois de Septembre à Novembre enregistrent les flux les plus élevés.

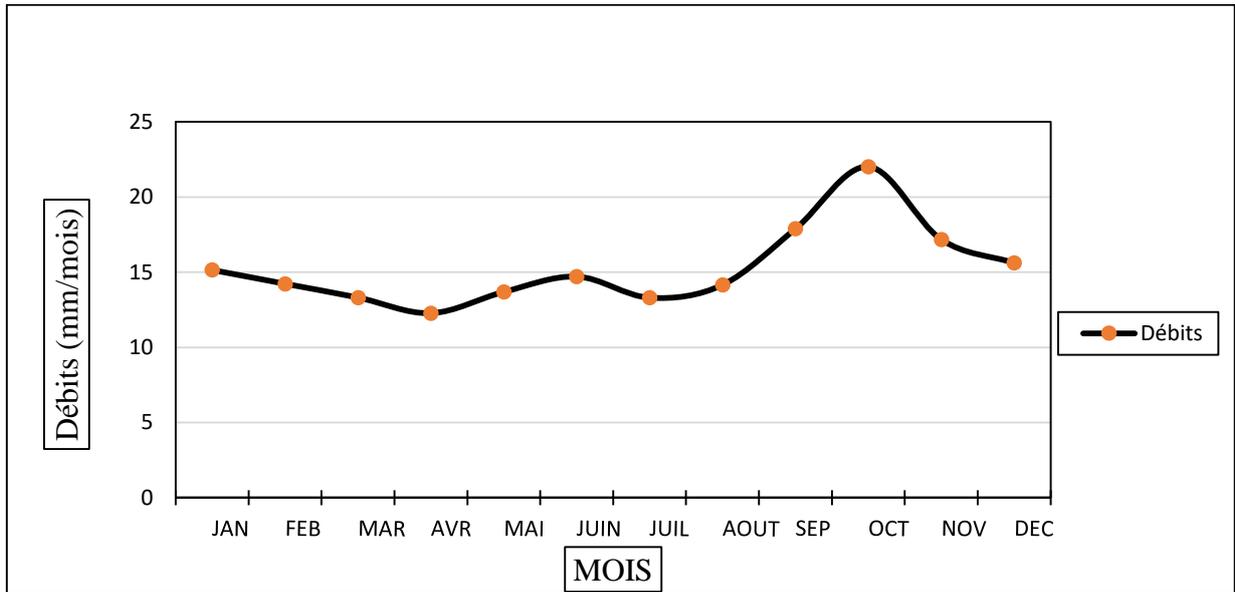


Figure 13 : Débits mensuels d'eau entrant dans le réservoir

- **Débits interannuels entrant dans le réservoir (1981 à 1997)**

La courbe des débits moyens interannuels permet d'observer une diminution considérable des débits d'eau entrant le réservoir au fil des années. À l'instar des précipitations annuelles, une baisse des débits annuels entrants dans le réservoir est aussi remarquée. Les lames d'eau oscillent entre 79,2 mm en 1997 et 361,2 mm en 1985 (Figure 11).

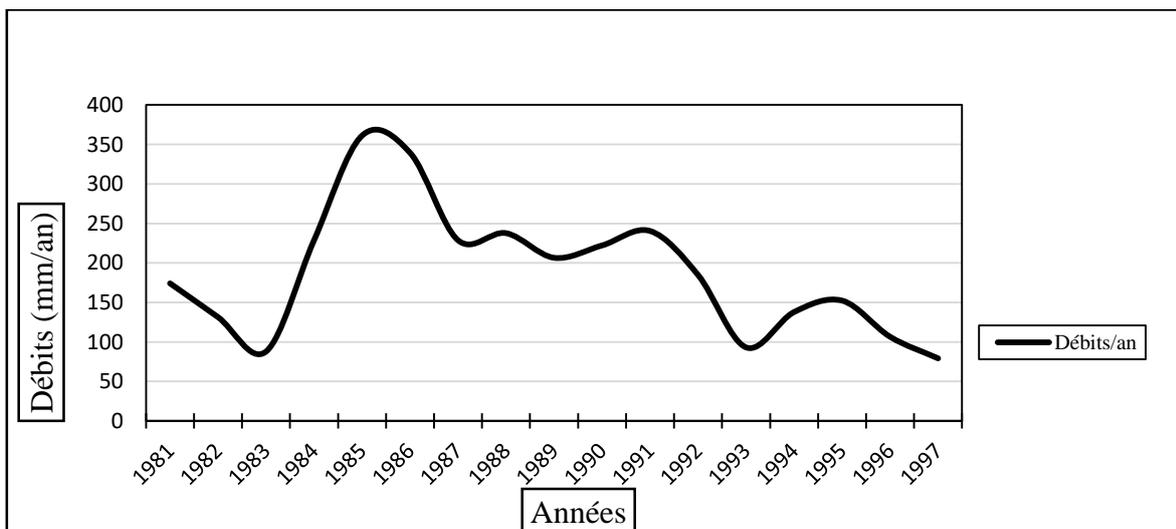


Figure 14 : Débits interannuels d'eau entrant dans le réservoir

La restitution des débits d'eau entrant dans le réservoir a permis au modèle SWAT d'extraire la charge de sédiment transportée par le ruissèlement jusqu'à la retenue.

3.1.2.4.2 Apports de sédiments

Les apports mensuels et annuels de sédiments entrant dans le réservoir sont respectivement représentés à la figure 15 et à la figure 16.

- **Apports mensuels de sédiments entrant dans le réservoir (1981 à 1997)**

La courbe représentant la charge moyenne mensuelle des sédiments (Figure 15) présente la même allure que celle des flux d'eau mensuels entrant dans le réservoir. Elle montre que le dépôt de sédiment dans le réservoir débute à la même période que la saison pluvieuse. Sur la figure 13, nous remarquons aussi qu'à l'instar des flux d'eau entrant dans le réservoir, les mois de Septembre à Novembre sont les plus productifs de sédiments. Octobre est le mois où le débit d'envasement du réservoir est maximal.

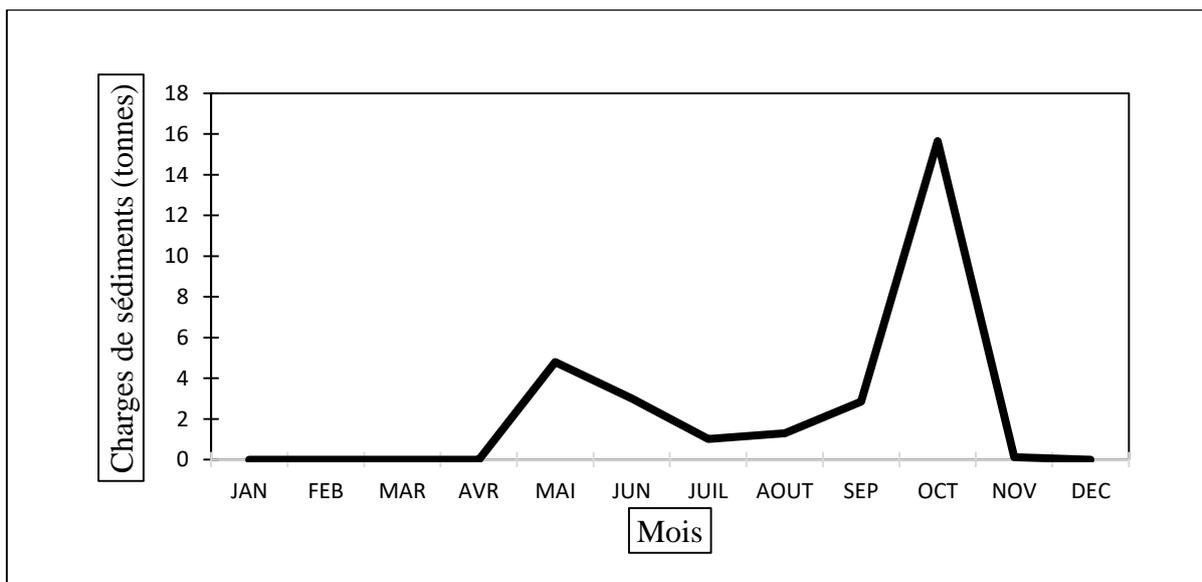


Figure 15 : Charges mensuelles de sédiments dans le réservoir

- **Apports interannuels de sédiments entrant dans le réservoir (1981 à 1997)**

La charge des sédiments entrant dans le barrage est quantifiée en années, soit 28,72 tonnes par ans. Durant la période de calage, la charge totale qu'a reçue le réservoir du bassin de la Loka est de 488,38 tonnes de sédiments. La figure 16 montre sa variation interannuelle. À travers cette variation, nous observons que l'année 1990 est la plus productrice de charge de sédiment avec 200 tonnes de sédiments entrée dans le réservoir.

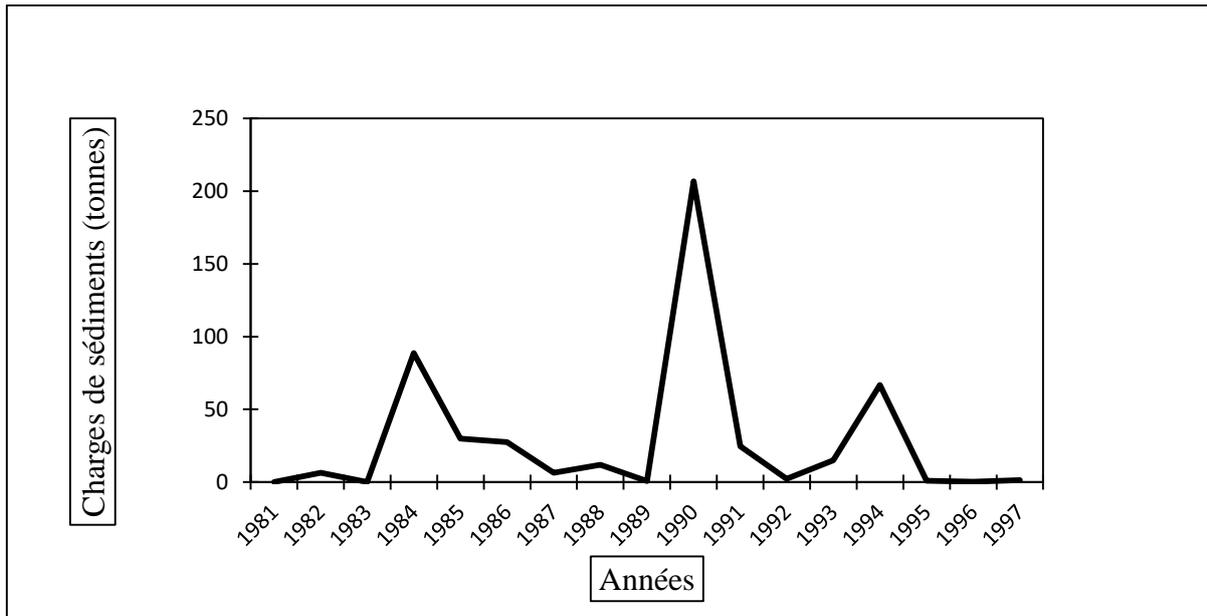


Figure 16 : Charges interannuelles de sédiment dans le réservoir de 1981-1997

3.1.2.4.3 Volume d'eau dans la retenue de la Loka

Les volumes d'eau dans le réservoir sont représentés mensuellement sur la figure 17 et annuellement sur la figure 18.

- **Volume d'eau mensuel dans le réservoir (1981 à 1997)**

De ce graphe (Figure 17), il ressort que le volume d'eau en moyenne présent dans le barrage est de 16 916 706,4 m³ par mois. Le graphe (Figure 14) montre aussi que le volume d'eau dans le réservoir de la Loka varie en deux phases pendant l'année :

- La première phase (Mai à Octobre) montre une augmentation du volume d'eau contenu dans le réservoir. Le volume maximal enregistré est de 27 458 235,30 m³ dans le mois d'Octobre.
- La deuxième phase de Novembre à fin Février, montre qu'il y'a une diminution du volume moyen mensuel d'eau contenu dans le réservoir, la valeur minimale observée est de 7 889 117,65 m³.

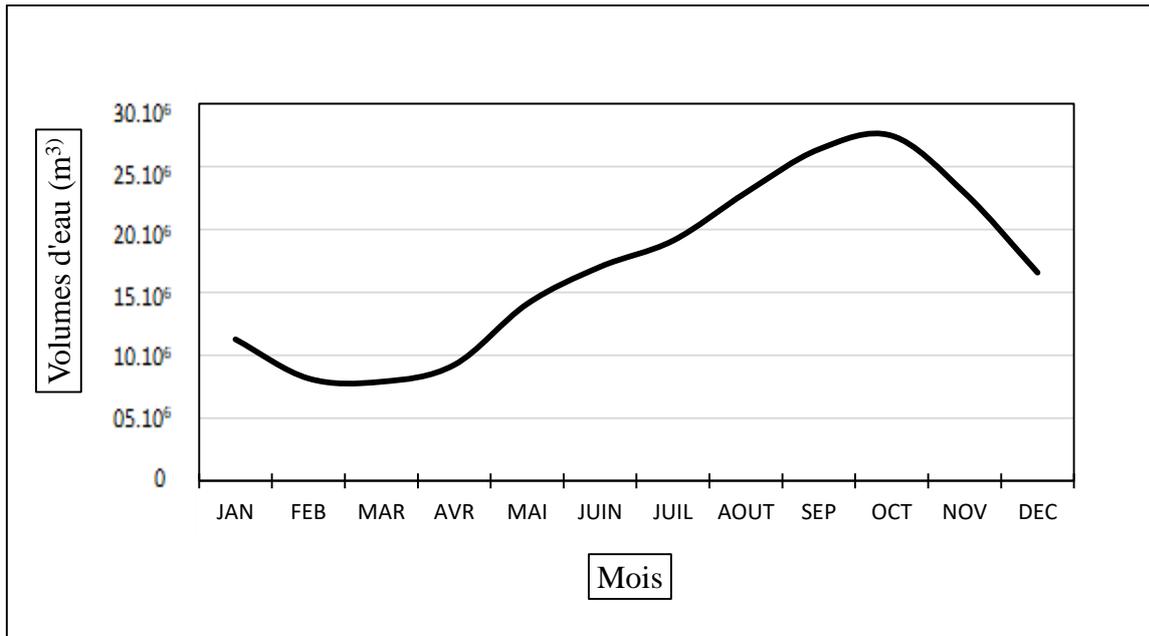


Figure 17 : Volumes mensuels d'eau dans le réservoir

- **Volume d'eau par année entrant dans le réservoir (1981 à 1997)**

La représentation graphique des volumes moyens interannuels d'eau dans la retenue (Figure 18) montre une variation plausible et une baisse régulière du volume d'eau dans la retenue pendant la période 1981 à 1997. Cette baisse est estimée à 384 604,16 m³/an ; soit une diminution de 2,26 % du volume d'eau par année.

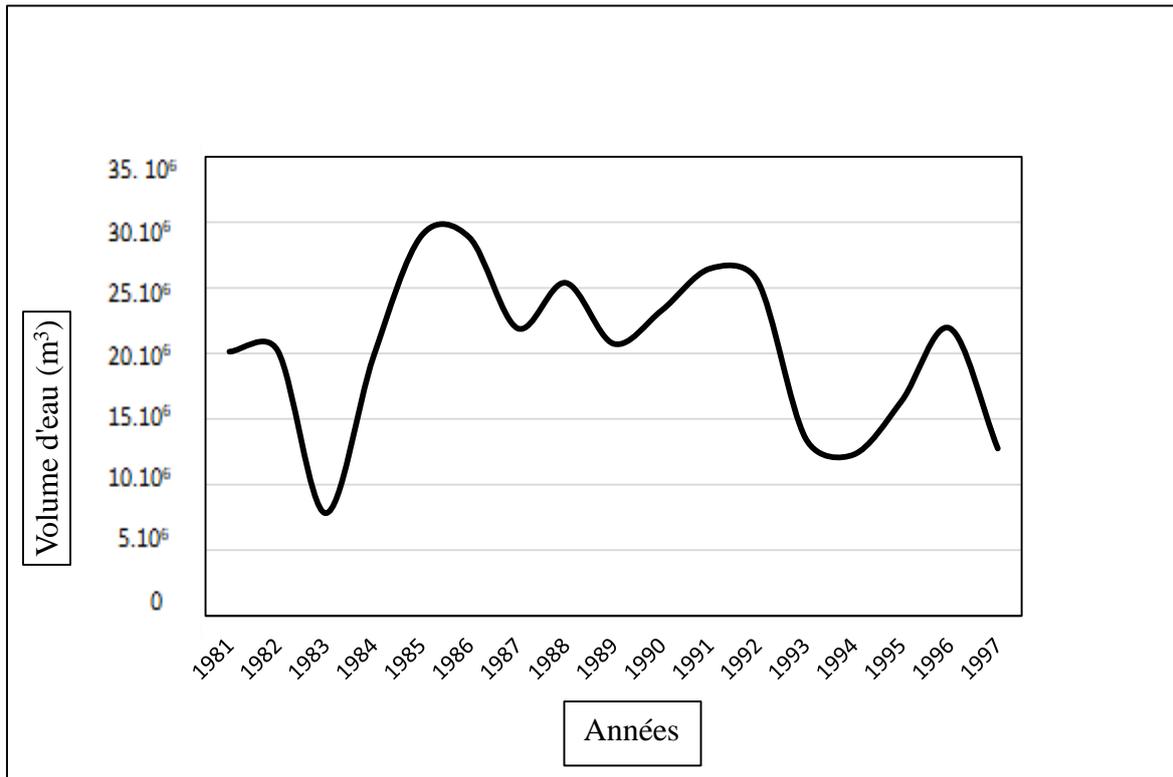


Figure 18 : Volumes interannuels d'eau dans le réservoir.

3.1.2.4.4 Évaporation d'eau au-dessus de la retenue de la Loka

Les figures 19 et 20 présentent les différentes variations de l'évaporation au-dessus du réservoir.

- **Volume d'eau mensuel perdu par évaporation au-dessus du réservoir (1981 à 1997)**

La courbe représentant l'évaporation mensuelle (Figure 19) du réservoir présente l'influence des températures sur la quantité d'eau dans le réservoir. Durant les mois de Janvier à Octobre, nous observons une augmentation de la quantité d'eau évaporée. Cependant, les mois d'Octobre à Décembre, nous observons une diminution de la quantité d'eau évaporée. L'évaporation au-dessus du barrage atteint son maximum dans le mois d'Octobre. Les valeurs mensuelles de la quantité d'eau dans le barrage perdues par évaporation oscillent entre 4 594 082,35 m³ dans le mois d'Avril et 9 677 882,35 m³ dans le mois d'Octobre.

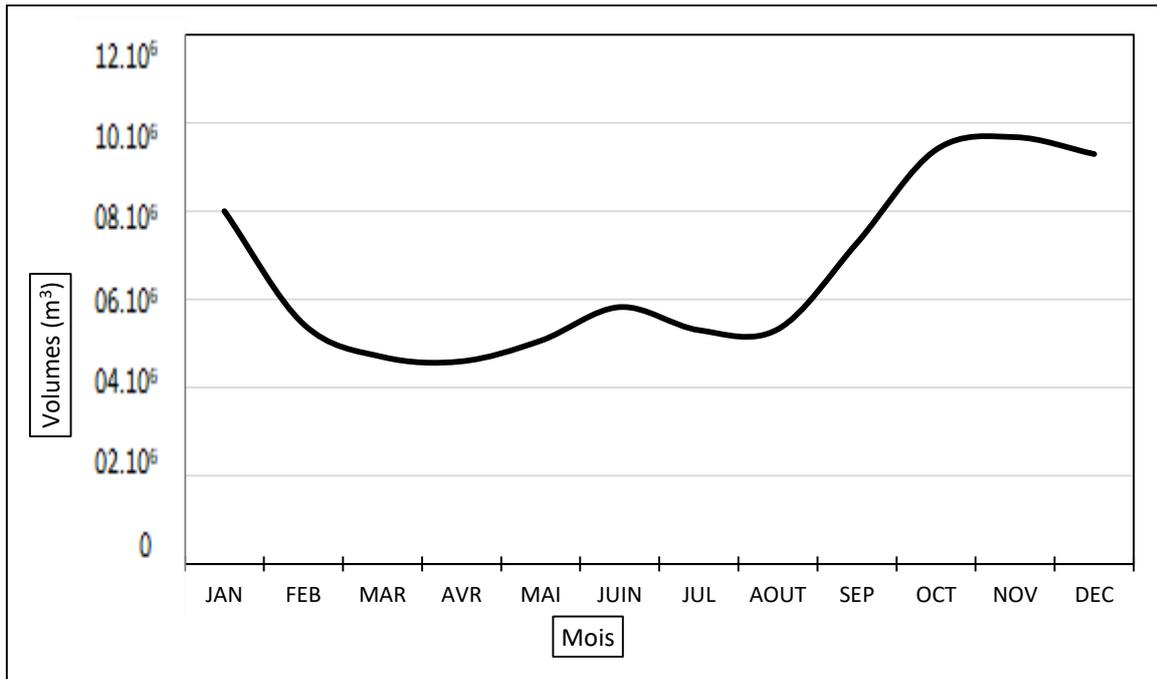


Figure 19 : Variabilité de l'évaporation mensuelle au-dessus de la retenue de la Loka

- **Volume d'eau annuel perdu par évaporation au-dessus du (1981 à 1997)**

L'allure de la courbe de l'évaporation interannuelle varie de la même manière que celle des volumes d'eau interannuelle dans le réservoir. L'évaporation au-dessus du réservoir représente en moyenne 56 % du volume d'eau contenu dans le réservoir.

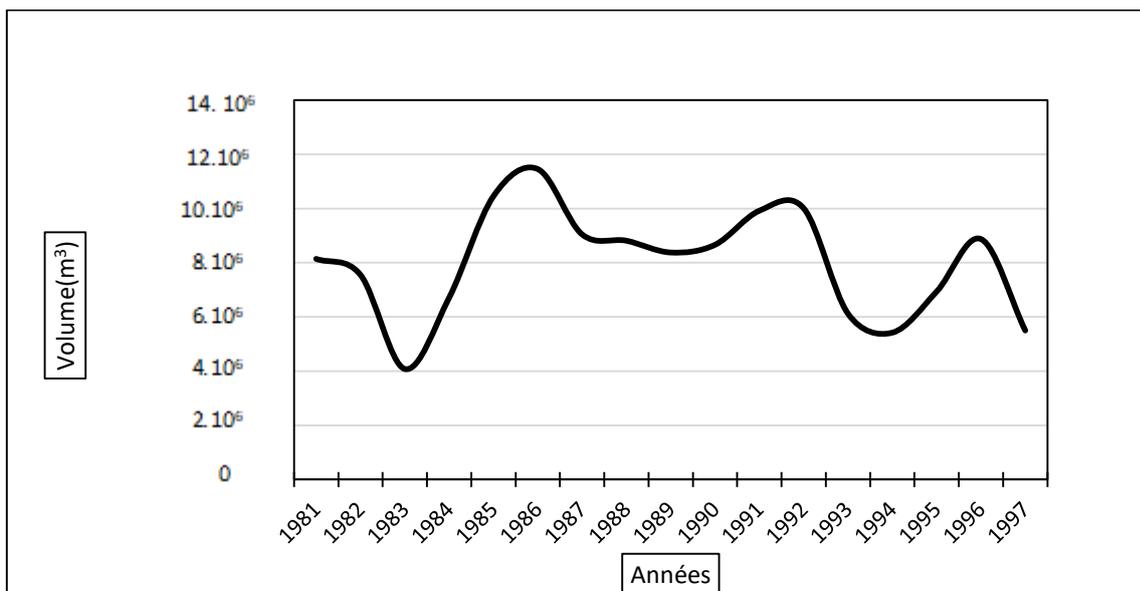


Figure 20 : Variabilité interannuelle de l'évaporation au-dessus de la retenue de la Loka

3.1.2.5 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique obtenu à travers le modèle SWAT sur la période 1980-2006 permet d'observer la repartie de la pluie (P) sur le bassin versant de la Loka. Les termes estimés sont l'évapotranspiration réelle (ETR), la lame d'eau écoulee (Ruissellement) et l'infiltration (I), ils représentent les paramètres du bilan hydrologique. La pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant de la Loka estimée est de 1 215,8 mm/an. Les pertes par évapotranspiration réelle sont estimées à 756,57 mm/an et représentent environ 62,37 % des précipitations. Ces résultats supposent que les potentialités en eau de surface qui en découlent sont relativement peu abondantes et sont estimés à 146,65 mm/an soit 12,1 % des précipitations. Par contre la lame d'eau écoulee est de 312,86 mm/an, elle représente 25,7 % de la précipitation.

Tableau VI : Bilan hydrologique du bassin versant de la Loka (1980-2006)

PARAMETRES	HAUTEURS (mm/an)	POURCENTAGES
Précipitation	1 215,8	100%
ETR	756,57	62,2%
Ruissèlement	146,65	12,1%
Infiltration	312,86	25,7%

3.1.3 Résultat de l'évaluation de la disponibilité-besoin en eau

3.1.3.1 Analyse des périodes hydrologiques (1980-1997)

Les variations mensuelles des débits moyens au cours de l'année hydrologique permettent d'observer les périodes de hautes eaux et de basses eaux (Tableau IX) dans le barrage. Durant les mois de Janvier à Aout, le CMD est inférieur à 1 alors le barrage est en période de basse eau. Cependant durant les mois de Septembre à Décembre, le CMD est supérieur à 1 donc le barrage est en période de haute eau pendant ces mois-ci.

Tableau VII : Analyse des périodes hydrologiques (1980-1997)

Périodes	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
CMD	0,99	0,93	0,87	0,80	0,90	0,96	0,87	0,96	1,17	1,44	1,12	1,02
Obs.	BE								HE			

BE : basses eaux

HE : hautes eaux

3.1.3.2 Résultat de l'adéquation disponibilité-besoin en eau

La figure 21 montre l'adéquation entre l'offre et les besoins en eau. Elle permet d'observer une augmentation de la consommation ou de la demande en eau de 2 % soit 122 033,30 m³ par année pendant que le volume d'eau dans le réservoir baisse chaque année de 2,26 %. Elle permet aussi d'observer une diminution brusque et considérable du volume d'eau contenu dans le réservoir aux années 1993 à 1994.

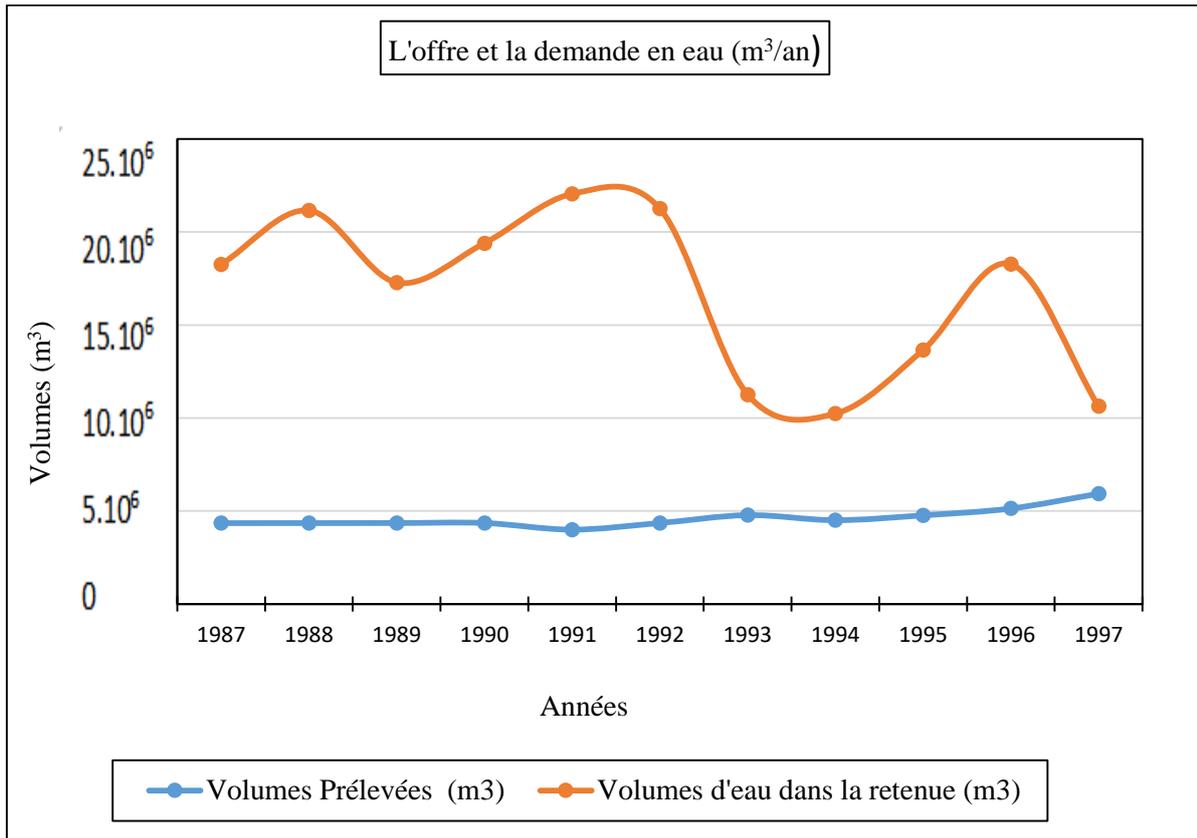


Figure 21 : Adéquation disponibilité-besoin en eau

3.2 Discussion

Les résultats de la variabilité climatique sur le bassin versant de la Loka à travers l'indice de Nicholson montrent une baisse générale de la pluviométrie sur le bassin versant de la Loka. Ces résultats permettent d'identifier les périodes excédentaires (1971 à 1986) et les périodes déficitaires (1987 à 2006). Le déficit pluviométrique obtenu sur ce bassin est de 11,08 %. Cela est dû à une tendance de sécheresse enregistrée sur l'Afrique de l'Ouest depuis les années de rupture climatiques. Ce résultat est similaire à ceux obtenus par plusieurs travaux en Côte d'Ivoire (Goula *et al.* 2006 ; Aké 2010 ; Kouassi *et al.* 2010) selon lesquels une baisse de la pluviométrie est ressentie depuis les années 70 dans le Nord et le Centre de la Côte d'Ivoire. La partition des périodes excédentaires et déficitaires est similaire à celle de Kouassi *et al.* (2013) et de Yao *et al.* (2018) dans les travaux d'étude menés sur le bassin versant du Bandama.

La restitution des flux d'eau du réservoir de la Loka à l'aide du modèle Agro-Hydrologique SWAT, a permis d'obtenir des résultats satisfaisants lors de la calibration et de la validation du modèle. Les critères d'optimisation du modèle que sont le coefficient de Nash et le coefficient de détermination (respectivement de 0,66 et de 0,66 à la calibration ; de 0,28 et de 0,32 à la validation) montrent de façon générale un bon synchronisme des débits simulés. Toutefois quelques écarts ont été observés à la validation. Ces écarts seraient imputables à la qualité et à la quantité des données (Neitsch *et al.*, 2005). Cependant, selon Shrestha *et al.* (2016) ces écarts pourraient aussi être liés aux incertitudes. Ces incertitudes sont issues de trois sources. Les incertitudes structurales qui sont propres au modèle (formalisme des équations). Les incertitudes des paramètres observables qui proviennent des erreurs de lectures, des approximations et conversion de données. Enfin, les incertitudes liées aux données non observables qui se produisent lors de la calibration et de la validation du modèle.

Les flux d'eau entrant dans le réservoir ont été calculés par le modèle SWAT sur la période de 1981 à 1997. Ces flux présentent une lame d'eau moyenne mensuelle de 15,3 mm et un volume d'eau moyen mensuel d'environ 16 millions de mètres cube entrant dans le réservoir. Les valeurs annuelles des volumes d'eau maximale et minimale selon le modèle SWAT sont respectivement de 27, 5 millions en 1983 et de 7, 9 millions en 1997 de mètre cube durant la chronique d'année 1980 à 1997. Ces valeurs sont sensiblement observées sur le terrain avec des volumes maximales de 18,5 millions et minimales de 4,9 millions de mètre cube. Quant à l'intensité des flux de sédiment durant les mois de Septembre à Octobre correspondant à la grande saison des pluies. Par ailleurs, cette période correspond aussi à la période de semis où les sols sont quasi-nus.

Résultats et Discussion

Concernant le bilan hydrologique établi, il en ressort que les flux d'eau sont fortement influencés par les facteurs climatiques ; notamment l'évaporation qui représente 62 % des flux sur le bassin versant. Par contre le ruissèlement qui traduit la quantité d'eau arrivant au réservoir est de 12 %. Ces résultats du bilan hydrologique justifient les résultats des travaux de Adomany (2017), Kouakou (2011) et Goula *et al.* (2006) qui ont démontré dans leurs travaux une diminution du volume d'eau dans les ressources due à l'intensification de l'évaporation. Ces valeurs du bilan hydrologique par rapport à l'infiltration montrent également que les nappes souterraines sont bien alimentées. Cela confirme les résultats obtenus dans les travaux de Kouamé (2019) dans lesquels l'infiltration représente une valeur de 27 % de la pluie annuelle.

Les débits restitués de 1981 à 1997 permettent d'effectuer l'analyse disponibilité-besoin en eau à travers le coefficient inter-mensuel de débit (CMD). Le CMD montre que durant les mois de Janvier à Aout, la retenue serait en période de basse eau et pendant les mois de Septembre à Décembre elle est en période de haute eau. Ainsi le barrage ne serait alimenté que durant quatre mois pendant toute l'année hydrologique. Ces différentes périodes décelées par le CMD concordent avec les conditions de tarissement du réservoir de la Loka pendant les mois de Mai, Juin et Juillet (période de basse eau) 2018 dans la ville de Bouaké (Goula *et al.*, 2009 ; Maillard, 2019).

Les résultats de l'adéquation entre la disponibilité et les besoins en eau montrent une discordance entre la disponibilité et les besoins en eau. Pendant que la quantité d'eau dans le réservoir diminue chaque année de 2,26 %, la demande en eau quant à elle croit de 2 %. Ces résultats obtenus démontrent des assèchements saisonniers au cours de l'année hydrologique des ressources en eau et une diminution régulière des volumes d'eau annuels. Ces résultats concordent avec ceux de Kouassi *et al* (2010) obtenus sur le bassin versant du N'Zi (Bandama). Dans ces travaux, il en résulte que la quantité des ressources en eau baisse à cause d'une intensification de l'évaporation sur tout le N'Zi en particulier et sur le Bandama en général. Les résultats obtenus de l'évaporation au-dessus du barrage démontrent que 56 % du volume d'eau contenue dans le réservoir est perdu par évaporation. Une telle dominance de l'évaporation sur la retenue pendant la saison sèche (Décembre à Mars) et les périodes de basse eau (Janvier à Août) démontre les conditions de l'assèchement périodique du barrage de la Loka.

CONCLUSION

Conclusion

Les travaux de cette étude portent sur l'évaluation de la disponibilité en eau de la retenue de la Loka de Bouaké, face au danger que représentent le changement climatique et l'anthropisation des bassins versant sur les ressources en eau. Pour mieux caractériser la retenue, la méthodologie utilisée a été basée essentiellement sur le logiciel SWAT. Une étude de la variabilité climatique du bassin a été réalisée au préalable. Cette étude de la variabilité climatique a montré une baisse de la pluviométrie sur la zone d'étude qui représente 11,08 % de la pluviométrie. Ces résultats obtenus ont permis d'évaluer le bilan hydrologique du bassin de la Loka en s'appuyant sur les critères d'évaluation du modèle. Ces critères d'évaluation du modèle lors de la calibration donnent des valeurs satisfaisantes ; un critère de Nash égale à 0,66 et un coefficient R^2 égale à 0,66. Les critères d'incertitudes P-facteur et R-facteur sont respectivement égale à 0,79 et à 1,02. Alors au travers de la calibration, le modèle SWAT révèle qu'il s'adapte aussi bien aux bassins versants des zones tropicales en restituant les débits du barrage des années 1981 à 1997. Quant aux valeurs des critères d'évaluation du modèle lors de la validation, le modèle montre des incertitudes. Ainsi lors de la validation sur la période de 2000 à 2006, le R-facteur est égale à 0,23, et le P-facteur est égale à 0,35. Les fonctions objectives que sont le coefficient R^2 et le critère de Nash sont respectivement égale à 0,28 et à 0,08. Ces incertitudes révélées sont parfois dues à la mauvaise manière de collecter les données et aussi à la carte de l'occupation de sol datant de 2006 par manque d'image satellitaire, il a été utilisé sur la période (1980-2006) de modélisation. Cependant le modèle demeure une référence dans la modélisation à cause de sa capacité à simuler les phénomènes même en absence de données observable de débit sur le supposé bassin versant. Ainsi le bilan hydrologique établi sur la période de 1980 à 2006 par le modèle montre que la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant est de 1215,8 mm/an. Cette hauteur annuelle des précipitations est répartie sur le bassin versant de la Loka par une évaporation annuelle estimée à 756,571 mm soit 62,2 % des précipitations, un ruissèlement annuel de 146,651 mm/an soit 12,1 % de la précipitation et une infiltration annuelle de 312,864 mm/an soit 25,7 % des précipitations. En plus, d'établir le bilan hydrologique du bassin versant de la Loka, le modèle a restitué les débits sur la période de 1980-1997 du barrage de la Loka. Il a aussi restitué le volume d'eau contenu dans le barrage, le volume de sédiment dans le barrage et le volume d'eau évaporé au-dessus du barrage sur la même période. Ici, les volumes d'eau contenus dans le barrage permettent d'observer une baisse régulière de 384 604,167 m³/an soit 2,26 % de leur volume. De même, l'évaporation au-dessus du barrage restituée permet d'observer que 52 % du volume d'eau contenu dans le barrage est aussi perdue par évaporation. Or, le bilan hydrologique établi par le modèle montre que le ruissèlement sur le bassin versant ne représente que 12 % des précipitations. En plus, le

Conclusion

coefficient mensuel de débit montre que le barrage est pratiquement en période de basse eau pendant toute l'année sauf pendant les mois d'Octobre, Novembre et Décembre. Tous ces paramètres influencent négativement la disponibilité en eau du barrage. Outre de cela, le barrage subit un prélèvement d'eau croissant de 2 % par année depuis les années 1990. Alors par rapport à l'assèchement du barrage pendant les mois de Mai, Juin et Juillet 2018, nous retiendrons que cela était probable car l'évaporation au-dessus du barrage avait certainement augmenté puisque les résultats que nous avons obtenus datent de 1997 or avec l'effet du changement climatique, la température de l'air ne cesse de croître.

REFERENCES

Références

- Ake G.E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 235 p.
- Aldomany M. (2017). L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-ouest de la France (Brenne et Limousin). Thèse de Doctorat, Université d'Orléans (Orléans France), 333 p.
- Anoh K.A. (2014). Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët-Boigny (Abidjan Côte d'Ivoire), 218 p.
- Anoh K.A., Koua T.J.J., Eblin S.G., Kouamé K.J. & Jourda J.P. (2017). Modelling Freshwater Availability Using SWAT Model at a Catchment-Scale in Ivory Coast. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(13) : 70-83.
- Anoh K.A., Koua T.J.J., Kouamé K.J., Jourda J.P. & Laurent F. (2018). Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using SWAT : a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*, 16(2) : 157-167.
- Arnold J.G., Allen P.M. & Bernhardt G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 172(1) : 47-69.
- Arnold J.G., Moriasi D.N., Gassman P.W., Abbaspour K.C., White M.J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R.D., Griensven A. & Van Liew M.W. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. Transactions of the ASABE, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4) : 1491-1508.
- Biesbrouck B., Wyseure G., Van Orschoven J. & Feyen J. (2002). AVSWAT 2000, Katholieke Universiteit Leuven (K. U. L.). Laboratory for Soil and Water Management (LSWM), Belgium 199 p.
- Bioteau T., Bordenave P., Laurent F. & Ruelland D. (2002). Évaluation des risques de pollution agricole à l'échelle de bassins versants: intérêts d'une approche par modélisation hydrologique avec SWAT. *Ingénieries-EAT*, 32, Saint Etienne (France) : 3-13.

Références

- Deschenes D. (2000). L'eau pénurie, conflit ou coopération? *Le maintien de la paix*, Bulletin 48, Canada : 4 p.
- Djè B.D. (2018). Évaluation et planification des ressources en eau du bassin versant de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Sciences et Technologies de l'eau, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 83 p.
- GIEC (2008). Les conséquences du changement climatique sur les ressources en eau. Rapport Technique de la GIEC sur le changement climatique, 11 p.
- Goula B., Kouassi V. & Savane L. (2009). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 18 (1) : .
- Goula B.T.A., Savane I., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide) *Vertigo* n°1, 12 p. <https://doi.org/10.4000/vertigo.2038>.
- INS- Institution Nationale de Statistiques. (2014). Recensement général de la population et de l'habitat de Côte d'Ivoire. 26 p.
- Koua T.J.-J. (2014). Apport de la modélisation hydrologique et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau : cas du bassin versant du lac de Buyo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 229 p.
- Kouakou K.E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjame (Abidjan, Côte d'Ivoire), 186 p.
- Kouamé E.C.G. (2019). Application du modèle SWAT pour la modélisation de l'écoulement dans un bassin versant peu jauge en zone Soudano-Sahélienne (Burkina Faso). Mémoire de master, option infrastructure et réseaux hydrauliques, Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture, Université 2ie, Burkina Faso, 95 p.
- Kouamé F.K. (2012). Diagnostic minéral d'un sol de bas-fond secondaire développé sur matériaux granito-gneissiques en région Centre de la Côte d'Ivoire : essai

Références

- comportemental de riziculture irriguée. Mémoire de Master sciences de la nature, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 50 p.
- Kouamé K.A. (2013). Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide soumis aux pressions anthropiques : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 195 p.
- Kouamé K.J. (2007). Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux GIRE du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse unique de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 222 p.
- Kouassi A.M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse unique de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Kouassi A.M., Kouame K.F., Koffi Y.B., Dje K.B., Paturel J.E. & Oulare S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 503 : 35-58 doi: 10.4000/cybergeo.23388
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Biémi J. (2013). Application du modèle de Maillet à l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi-Bandama. *Journal of Asian Scientific Research*, 3(2) : 214-228.
- Laborde J.-P. & Morel M. (1991). Aspects climatologiques liés aux possibilités d'alimentation en eau potable par collecte des eaux pluviales dans le Nord du Cameroun. *Hydrologie. Continental*, 6(1) : 55-66.
- Maillard T. (2019). La ressource en eau de la région du Gbêkê (Côte d'Ivoire). *Urgence Eau Côte d'Ivoire*, halshs-02277088 (Normandie, France), 14 p.

Références

- Mangoua M.J. (2013). Évaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Géosciences et Environnement, Université Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 171 p.
- Mckee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. Actes de la 8^{ième} conférence on applied climatology (Anaheim, Californie), 179-184 p.
- MEFP (2018). Objectifs du développement durable (ODD). Rapport finale du Forum Politique de haut niveau, Sénégal, 153 p.
- Madiodio N. (2004). Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l'Ouest. *Vertigo*, 5, Ouagadougou (Burkina Faso) 13 p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. & King K.W. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Soil and Water Research Laboratory, Temple, USA 494 p.
- Nicholson S.E. (1980). The nature of rainfall fluctuation in subtropical West Africa. *Weather Review*, 108(4) : 473-487.
- OMM- Organisation météorologique mondiale. (2012). Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations. *Temps-Climat- Eau*, 24 p.
- OMS/UNICEF (2017). 2,1 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable salubre. <https://www.fr/article/21-milliards-de-personnes-n-ont-pas-acces-l'eau-potable-salubre>. *unicef.fr*.
- Roukia B.T. (2019). Évaluation des performances du modèle Agro-hydrologique SWAT à reproduire le fonctionnement hydrologique du bassin versant Nakhla (Rif Occidental, Maroc). *European Scientific Journal*, 15(5) : 311-333.
- Savané I., Coulibaly K.M. & Gioan P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 12(4) : 231-237

Références

- Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J. F., Lubès-Niel H., Fritsch J. M., Masson J. M. & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Internationale Association of Hydrological Sciences*, 252 : 323-337.
- Shrestha M.K., Recknagel F., Frizenschaf J. & Meyer W. (2016). Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semiarid Onkaparinga catchment in South Australia. *Agricultural Water Management*, 175, Afrique du Sud : 61-71.
- Thiebault M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT. Mémoire d'ingénieure, École de Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (Strasbourg, France), 55 p.
- Yao F.Z., Reynard E., Fallot J.M., Ouattara I., Kouakou E. & Savane I. (2018). Analyse de la variabilité climatique dans le bassin versant agricole du Bandama blanc, Nord de la Côte d'Ivoire. *Actes Colloque AIC* (Nice, France), 4 p.
- Youan T.M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.

Résumé

Cette étude est menée pour comprendre le fonctionnement hydrologique de la retenue de la Loka utilisée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Bouaké. Elle a pour but de connaître les causes de l'assèchement du barrage de la Loka survenues en 2018. Alors la base de données utilisée est essentiellement constituée de données climatiques, d'image satellitaire, de données cartographiques, et de données morphologiques. L'étude de la variabilité climatique met en évidence une tendance à la baisse des régimes pluviométrique sur le bassin de la Loka qui représente un déficit pluviométrique de 11 %. Pour la quantification des flux de la retenue par le modèle SWAT, elle a permis d'obtenir les flux d'eaux dans la retenue de la Loka. Ces flux mettent en évidence une perte annuelle de 62 % par évaporation du volume d'eau dans la retenue. Ainsi l'ETP représente 67 % des précipitations contre le ruissellement qui est de 12% des précipitations et l'infiltration représente 25 % des précipitations. Ces flux restitués ont été considérés comme données pour l'étude de la comparaison disponibilité-besoin en eau et cela a décelé deux périodes hydrologiques dans la retenue. Une période de basses eaux et une période de hautes eaux. Aussi elle a permis d'observer une baisse annuelle de 2% du volume d'eau de la retenue depuis l'année 1980 et une augmentation de 2,2 % de la demande en eau.

Mots clés : Bouaké, hydrologique, Loka, modèle, SWAT

Abstract

This study is conducted to understand the hydrological functioning of the Loka dam used to supply drinking water to the city of Bouaké. It aims to find out the causes of the drying up of the Loka dam that occurred in 2018. Therefore, the database used is essentially made up of climatic data, satellite images, cartographic data, and morphological data. The study of climatic variability shows a downward trend in rainfall patterns in the Loka basin, which represents a rainfall deficit of 11%. For the quantification of the flows of the reservoir by the SWAT model, it was possible to obtain the water flows in the Loka reservoir. These flows show an annual loss of 62% of the water volume in the reservoir due to evaporation. Thus, the ETP represents 67% of the precipitation against the runoff which is 12% of the precipitation and the infiltration represents 25% of the precipitation. These restituted flows were considered as data for the study of the water availability-requirement comparison and this detected two hydrological periods in the reservoir. A low water period and a high water period in the reservoir. The study also showed a 2% annual decrease in the volume of water in the reservoir since 1980 and a 2.2% increase in water demand.

Key words: Bouaké, hydrology, Loka, model, SWAT