



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :

2020-2021

N° D'ORDRE : 0445/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0416009715

MASTER

Option : Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**CARACTERISATION DES ETIAGES DANS UN CONTEXTE
DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS DU BASSIN
VERSANT DE LA MARAHOUE A BOUAFLE (CENTRE-
OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE).**

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

AGRE Jean Marc

JURY

**Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Université
Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Encadreur : M. KOUA Tanoh Jean-Jacques, Maître-Assistant, Université
Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Examineur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant, Université Jean
Lorougnon Guédé de Daloa**

Soutenu publiquement

le : 12/10/2021



**UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE**

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique**

**ANNEE ACADEMIQUE :
2020-2021**

N° D'ORDRE : 0445/2021

**N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416009715**

MASTER

Option : Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**CARACTERISATION DES ETIAGES DANS UN
CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : CAS
DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUE A BOUAFLE
(CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE).**

**LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT**

Présenté par :

AGRE Jean Marc

JURY

**Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Université
Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Encadreur : M. KOUA Tanoh Jean-Jacques, Maître-Assistant, Université
Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Examineur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant, Université Jean
Lorougnon Guédé de Daloa**

**Soutenu publiquement
le : 12/10/2021**

DEDICACE

A mon père AGRE Obrou

Et

Ma mère AMBON Assere Jisel Alida

qui malgré les difficultés m'ont toujours soutenu. Que Dieu le TOUT PUISSANT vous
bénisse.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- toutes les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE, Présidente de ladite université, pour leurs dévouements dans la formation des étudiants ;
- le Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement pour l'amour et les efforts à vouloir faire de l'UFR une UFR de renom ;
- le Docteur KOUADIO Zilé Alex, chef du département des sciences de la terre, pour son encadrement et sa disponibilité à aider l'ensemble des étudiants de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement ;
- le Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour tous ses efforts à l'égard de notre promotion.

Je remercie la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH) pour le stage effectué au sein de la Direction de l'hydrologie.

Je remercie Madame BAHIRE Saramatou Epse KONE, Directrice de l'hydrologie qui a permis que ce stage ait lieu au sein de sa structure.

Je remercie Monsieur OUATTARA Edouard Pétin, Sous-directeur de l'hydrologie opérationnelle qui a su, de par ses conseils et ses directives, me guider durant le stage.

Je remercie également l'équipe de l'hydrologie opérationnelle pour l'accueil chaleureux au sein du service.

Mes remerciements vont également à l'endroit du Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Directeur scientifique de ce mémoire. Je vous réitère ma sincère reconnaissance pour m'avoir inculqué l'amour du travail bien fait.

Ma profonde gratitude s'adresse également au Docteur KOUA Tanoh Jean-Jacques, pour avoir accepté de diriger ce travail, me faciliter la compréhension du thème et m'accorder toute son attention et sa patience.

Un remerciement spécial au Docteur SORO Tanina Drissa, pour ses corrections et conseils qui ont contribué à améliorer ce travail.

Je remercie les Doctorants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour leurs disponibilités et leurs aides.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les enseignants de l'université Jean Lorougnon Guédé qui se sont rendus disponibles pour me dispenser le savoir et me guider.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
1.1 Présentation de la zone d'étude	3
1.1.1 Situation géographique.....	3
1.1.2 Relief	4
1.1.3 Climat	4
1.1.4 Réseau hydrographique	5
1.1.5 Situation démographique.....	6
1.1.6 Activités socio-économiques.....	7
1.1.7 Aperçu géologique	7
1.1.8 Aperçu hydrogéologique	8
1.2 Généralités sur les étiages	9
1.2.1 Définition	9
1.2.2 Etiage et basse eau.....	9
1.2.3 Étiage et sécheresse	9
1.2.4 Risques associés à l'étiage	10
1.2.5 Période de retour	10
1.3 Généralités sur les modèles climatiques	10
1.3.1 Modèles climatiques globaux (MCG)	10
1.3.2 Modèles climatiques régionaux (MCR)	11
1.3.3 Description des scénarios RCP4.5 et RCP8.5	11

Conclusion partielle.....	12
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	13
2.1 Matériel.....	13
2.1.1 Données hydrométriques.....	13
2.1.2 Données climatiques	13
2.1.3 Logiciels	13
2.2 Méthodes	13
2.2.1 Détermination des débits seuils.....	13
2.2.1.1 Variable utilisée.....	13
2.2.1.2 Analyse fréquentielle des débits d'étéage.....	14
2.2.1.3 seuil de vigilance et de crise.....	17
.....	17
2.2.2 Evaluation des étiages	17
2.2.3 Simulation des débits d'étéage à l'horizon futur (2021-2050)	18
2.2.3.1 Description, structure et fonctionnement de GR2M	18
2.2.3.2 Critère d'optimisation du modèle.....	20
2.2.3.3 Calage et validation du modèle GR2M	20
2.2.3.4 Simulation des débits d'étéage à l'horizon 2021-2050 dans le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé	21
Conclusion partielle.....	22
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	23
3.1 Résultats	23
3.1.1 Estimation des débits d'étéage à différentes périodes de retour	23
3.1.1.1 Valeurs des QMNA.....	23
3.1.1.2 Analyse fréquentielle des quantiles d'étéage	24
3.1.2 Seuils d'étéage	27
3.1.3 Evaluation des étiages	28
3.1.4 Simulation des débits d'étéage à l'horizon futur	29
3.1.4.1 Calage et validation du modèle	29
3.1.4.2 Simulation des écoulements à l'horizon 2021-2050	31

3.2 Discussion	32
Conclusion partielle	33
CONCLUSION	34
REFERENCES	35

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AEP	: Alimentation en Eau Potable
AIC	: Critères d'Information Akaike
BIC	: Critères d'Information Bayésien
CEDEAO	: Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CERFACS-CM 5	: Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique – Couplé Modèle 5
Cs	: Coefficient Asymétrique
Cv	: Coefficient de Variation
DCR	: Débit de Crise
DGIHH	: Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine
DH	: Direction de l'Hydrologie
DSA	: Débit-Seuil d'Alerte
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
ETR	: Evapotranspiration Réelle
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GR2M	: Génie Rural à 2 Paramètres au pas de temps Mensuel
IPCC	: Intergovernmental Panel for Climate Change
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MCG	: Modèles Climatiques Globaux
MCR	: Modèles Climatiques Régionaux
QMNA	: Débit Mensuel Minimal Annuel
RCA4	: Rossby Centre Atmospheric Regional model version 4
RCM	: Regional Climate Model
RCP	: Representative Concentration Pathways
SMHI	: Institut Météorologique et Hydrologique Suédois
SODECI	: Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education la Science et la Culture
URL	: Uniform Ressource Locator

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Information sur le modèle climatique régional	11
Tableau II : Caractéristiques des scénarios RCP4.5 et RCP8.5	12
Tableau III : Etiage caractéristique de la rivière Marahoué à Bouaflé.....	17
Tableau IV : Tables de Gerbier	22
Tableau V : Valeurs des QMNA de 1961 à 1994 du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.	23
Tableau VI : Caractéristiques statistiques des débits d'étiage de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994).....	24
Tableau VII : Comparaison des lois statistiques pour l'ajustement des modules du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé	26
Tableau VIII : Quantiles d'étiage et périodes de retour.....	27
Tableau IX : Débits-seuils d'étiage	27
Tableau X : Classification des étiages	28
Tableau XI : Résultats du calage et validation du modèle hydrologique GR2M	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.....	3
Figure 2 : Carte du relief du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé	4
Figure 3 : Diagramme ombrothermique du Bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994).....	5
Figure 4 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Marahoué.....	6
Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de la Marahoué (Tagini, 1971) modifiée	8
Figure 6 : Structure et fonctionnement du modèle GR2M (Mouelhi <i>et al.</i> , 2006)	19
Figure 7 : Evolution chronologique des débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994)	24
Figure 8 : Modèle d'ajustement aux séries des débits d'étiage.....	25
Figure 9 : Critère de comparaison graphique	26
Figure 10 : Débit observé et simulé pendant la période de calage	30
Figure 11 : Débit observé et simulé pendant la période de validation	30
Figure 12 : Evolution des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 par RCP4.5	31
Figure 13 : Evolution des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 par RCP8.5	31

INTRODUCTION

INTRODUCTION

De nos jours, les changements climatiques se font plus ressentir dans le domaine de l'hydrologie. En effet, ils influencent directement les précipitations ainsi que la température, deux variables dont dépend fortement le régime hydrologique des rivières. Les études réalisées sur le sujet démontrent que ces changements auront un impact significatif sur les ressources en eau des régions touchées (Whitfield *et al.*, 2003). Certaines études dont celles de Xu & Singh (2004), Pachauri & Reisinger (2008) démontrent que l'eau sera la ressource la plus impactée par le changement climatique.

Partout dans le monde, l'eau est une ressource naturelle, indispensable à la vie, aux écosystèmes et constitue un bien à caractère socio-économique incontestable (De Marsily, 2013). Les changements climatiques risquent de modifier le régime fluvial de nos rivières. Les études prévoient une augmentation des événements extrêmes, en l'occurrence les étiages (Garcia, 2016) qui constituent un problème lié aux changements climatiques dont on cherche à limiter l'impact sur les ressources hydriques. En effet, selon Garcia (2016), l'étiage correspond à une diminution du débit des cours d'eau, voire leur assèchement sur une certaine période. L'impact de l'étiage sur le volume d'eau disponible peut entraîner de nombreux problèmes. Cependant, les rivières servent régulièrement à l'approvisionnement en eau, à l'irrigation ou encore à la production d'énergie. Les cours d'eaux jouent aussi un rôle important dans le maintien du bon fonctionnement des écosystèmes. Ces besoins en eau, liés aux écosystèmes et aux activités anthropiques, demeurent importants, même dans les périodes d'étiage. Cela se traduit souvent par une augmentation des pompages, de l'irrigation, etc., ce qui accroît le déficit en eau, notamment lors de ces périodes d'étiage. Il est observé régulièrement de nombreuses conséquences liées à l'étiage et plus généralement aux sécheresses dans le monde.

En Côte d'Ivoire, aux mois de mars-avril 2018, un affluent du Bandama (la Loka) qui alimente la ville de Bouaké au centre du pays a tari, entraînant de nombreuses coupures d'eau et obligeant les autorités ivoiriennes à réaliser des forages d'eau pour les besoins en eau de cette localité.

Les étiages présentent un véritable problème de disponibilité des ressources en eau. A Bouaké, l'eau du bassin versant de la marahoué est utilisée pour divers usages (agriculture, industrie, l'alimentation en eau potable,...). Mais au cours de l'année 2019-2020, l'eau de ce bassin a connu un étiage très sévère suite au prélèvement abusif de l'eau dans ce bassin et au phénomène du changement climatique. A cet effet, le manque d'eau s'est fait ressentir car le volume d'eau restant n'était plus en quantité suffisante pour satisfaire les besoins de la population. Suite à cela, la SODECI (Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire), qui a pour rôle d'assurer l'alimentation en eau potable de cette localité, a consulté la direction de

INTRODUCTION

l'hydrologie pour résoudre ce problème afin d'exploiter de façon rationnelle la ressource. C'est dans cette optique que la présente étude intitulée : « **Caractérisation des étiages dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)** » a été initiée.

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

De façon spécifique, il s'agit de :

- déterminer les débits-seuils ;
- évaluer les étiages ;
- simuler les débits d'étiage à l'horizon futur.

Ce mémoire s'articule autour de trois grandes parties :

- la première partie présente les généralités sur la zone d'étude ainsi que les notions liées à la thématique abordée ;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisées ;
- la troisième partie aborde les résultats de l'étude, suivis de leur discussion.

Une conclusion suivie des perspectives terminent ce mémoire.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1.1 Présentation de la zone d'étude

1.1.1 Situation géographique

Le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est localisé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 5°25' et 7°00' W et les latitudes 6°45' et 9°28' N (Figure 1). Il est l'un des principaux affluents en rive droite du bassin du Bandama. Il draine une superficie de 19 800 km². Le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est circonscrit dans un rectangle équivalent de 302 km de long et 166 km de large et situé à califourchon entre zone de forêt et zone des savanes.

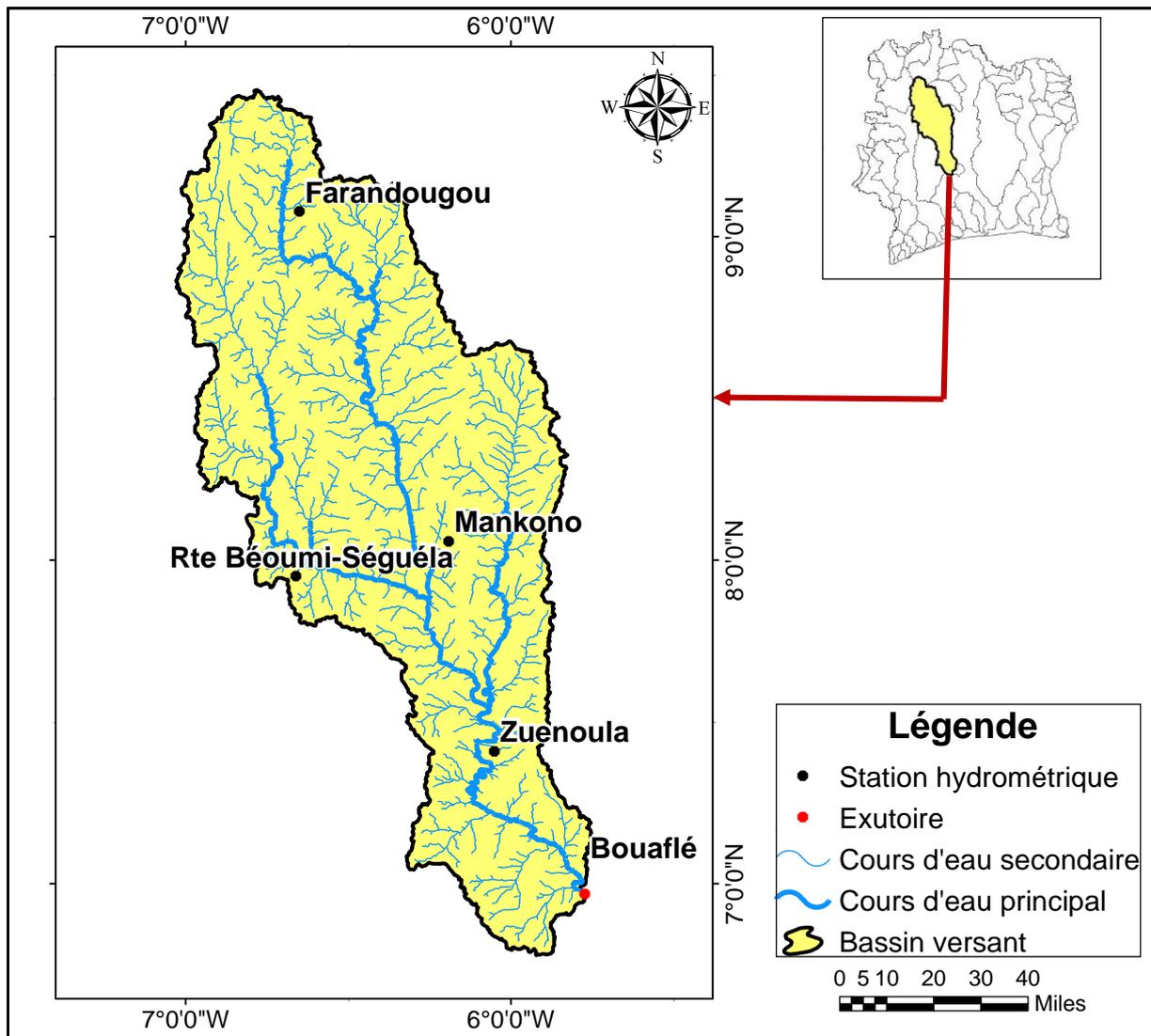


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé

1.1.2 Relief

Le relief du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est mis en évidence par un modèle numérique d'altitude acquis en format Shuttle Radar Topography Mission et fourni par le site (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/fnf_index.htm).

De l'aval à l'amont du bassin versant, les altitudes rencontrées sont comprises entre 162 m et 452 m pour près de 80 % de sa superficie (Figure 2). Les altitudes supérieures à 500 m sont situées au Nord du bassin vers Farandougou.

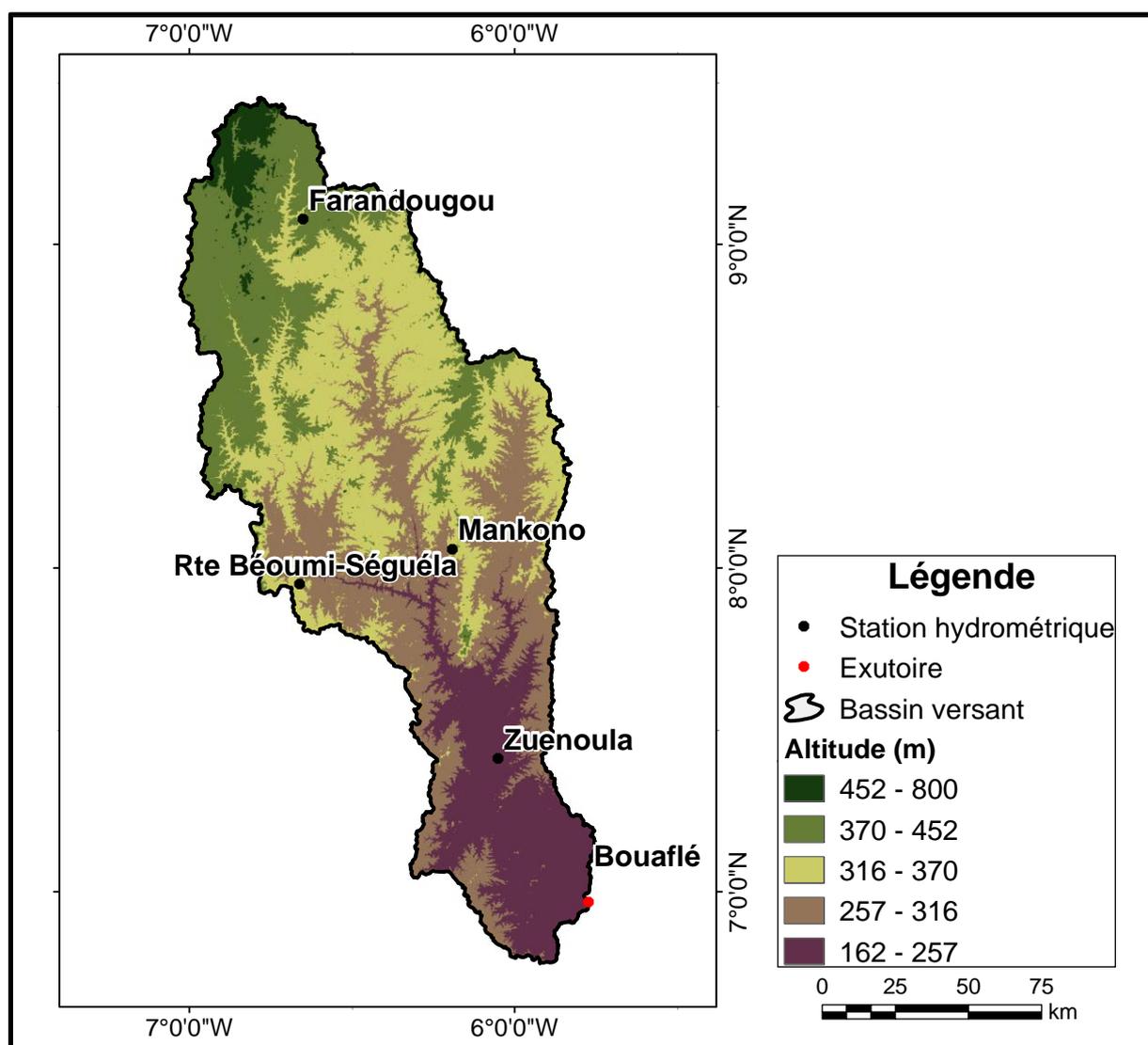


Figure 2 : Carte du relief du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé

1.1.3 Climat

Le climat est de type transitoire atténué caractérisé par deux saisons (une saison sèche et une saison des pluies) (Figure 3).

GENERALITES

Une saison sèche allant de novembre à février avec une pluie moyenne de 37 mm et une température moyenne de 25,71°C et une saison des pluies allant de mars à octobre avec une pluie moyenne de 146 mm et une température moyenne de 23,71°C.

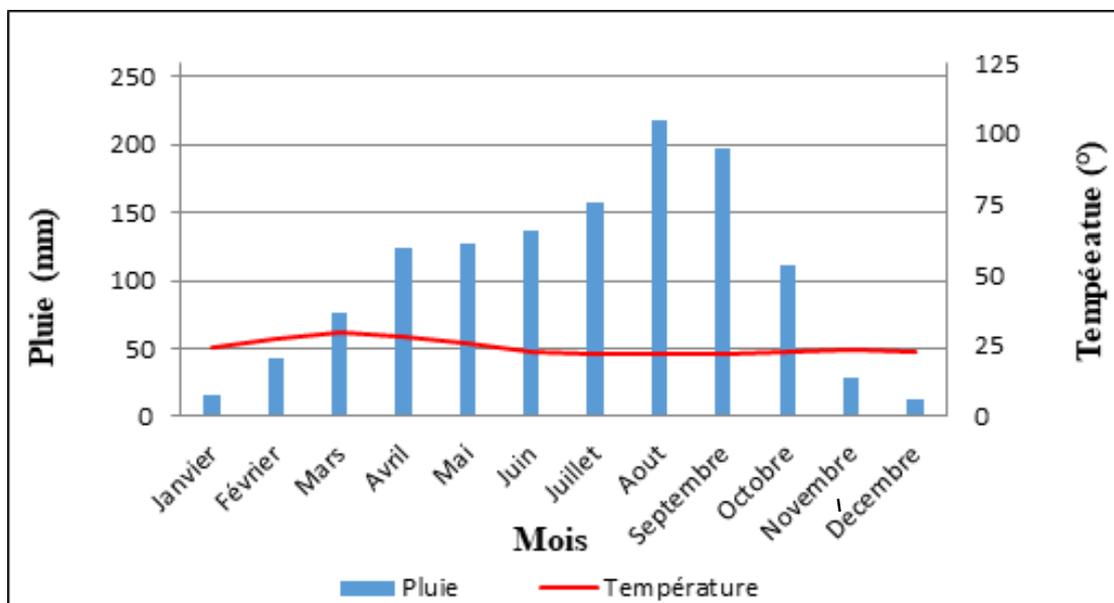


Figure 3 : Diagramme ombrothermique du Bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994)

1.1.4 Réseau hydrographique

L'orientation générale de son cours d'eau principal, d'une longueur de 450 kilomètres environ se fait du Nord-Ouest vers le Sud-Est. Il s'écoule d'Ouest en Est ; puis, sur une distance de 50 km environ. Il prend une orientation Nord-Sud avant de reprendre, quelques kilomètres en aval, sur encore une cinquantaine de kilomètres. A partir de ce point, l'orientation devient assez régulière (Nord-Ouest vers Sud-Est) jusqu'à sa confluence avec le Bandama Blanc à quelques dizaines de kilomètres en aval de la station de Bouaflé (Figure 4).

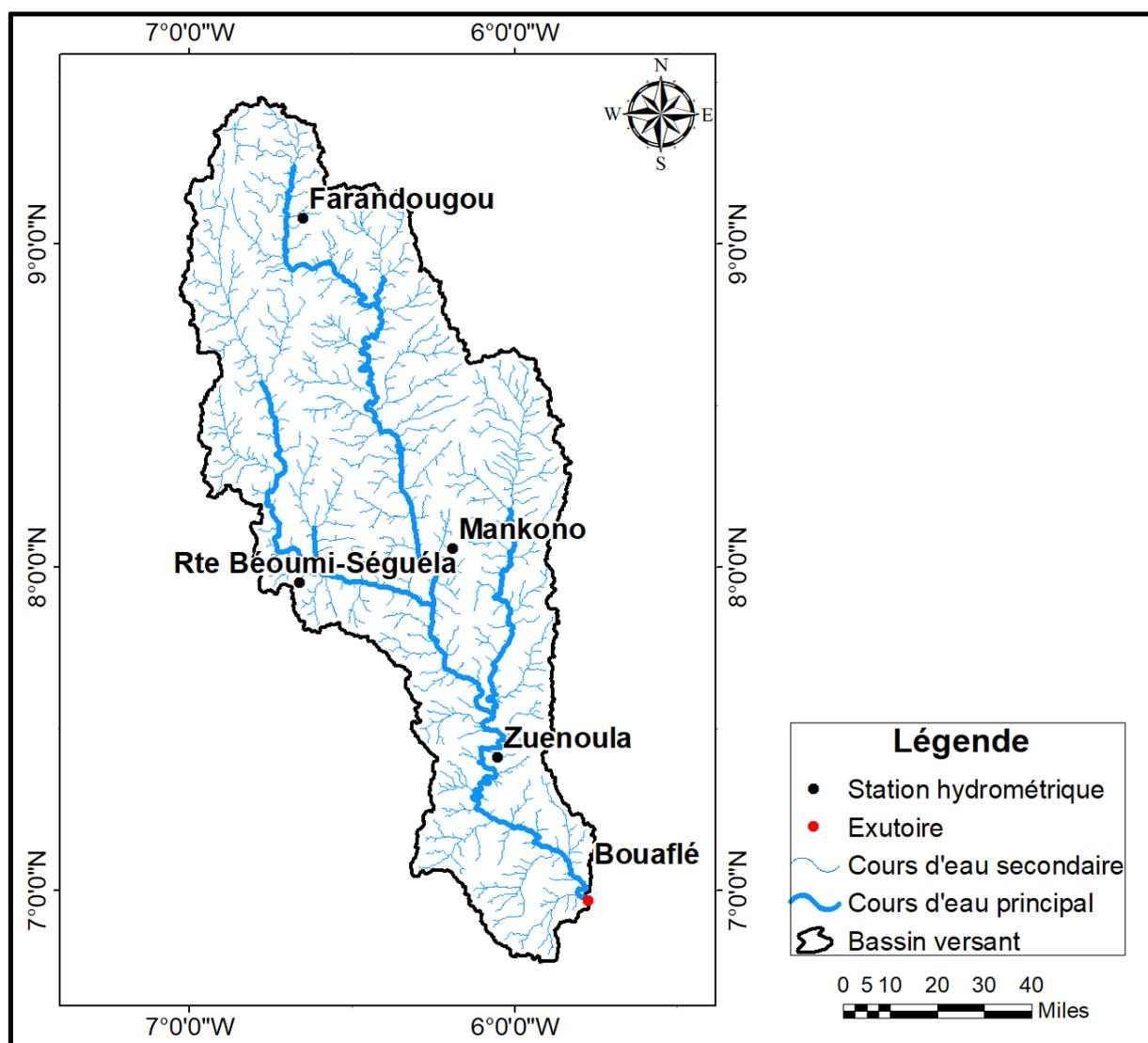


Figure 4 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Marahoué

1.1.5 Situation démographique

Le département de Bouaflé était estimé à 409 683 habitants (RGPH, 2014). La population rurale représente 36 % contre 54 % de résidant en ville. La population est cosmopolite. Elle est composée majoritairement des populations autochtones Gouro venus de la forêt, auxquelles s'ajoutent les Yaouré et Ayaou (Baoulé) originaires de la savane. Cette population cohabite avec des populations allochtones originaires du Nord (Malinké, Sénoufo, Koyaka, Mahou) et de l'Est (Agni) de la Côte d'Ivoire et les allogènes venus de la Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO).

Outre ces nationaux, la ville de Bouaflé comprend une importante communauté étrangère composée de ressortissants Burkinabé et de Malien.

1.1.6 Activités socio-économiques

Située dans la deuxième zone de production du binôme café/cacao, l'économie de la région de la Marahoué est essentiellement basée sur l'agriculture. En effet, 62,36 % de la population du chef-lieu de département (Bouaflé) exercent dans le secteur agricole (RGPH, 2014).

Les paysans de la région de Bouaflé peuvent être considérés comme des agro-éleveurs. Leur système de production est du type agro-pastoral où l'agriculture et l'élevage cohabitent de façon complémentaire. La production agricole repose essentiellement sur les cultures de rente et sur certaines cultures vivrières. Les principales spéculations agricoles pratiquées sont :

- les cultures d'exportation représentées en majorité par le café, le coton et le cacao. L'hévéa et le palmier à huile sont présents bien que très peu développés ;
- les cultures vivrières avec principalement le riz pluvial, le maïs, l'arachide, l'igname, la banane plantain, la patate, le taro et la canne à sucre. Ces cultures sont surtout pratiquées en association avec les cultures de rente ;
- les cultures maraîchères, comme le chou, la salade, la tomate, l'oignon vert, la carotte sont pratiquées le plus souvent par les femmes. Cependant, on rencontre quelques hommes dans ce domaine.

1.1.7 Aperçu géologique

Les formations géologiques du bassin versant de la Marahoué appartiennent principalement au précambrien. Ainsi, dans son tiers supérieur, le bassin a la particularité de présenter des intrusions de granitoïdes hétérogènes (granites, migmatites) dans des conglomérats de schistes à ciments grauwakeux autour desquels apparaissent des massifs rocheux d'origine volcano sédimentaire, des amphibolites et des granites divers (Figure 5). Au milieu de ces granitoïdes hétérogènes, apparaissent dans le tiers central, des massifs rocheux isolés constitués de granitoïdes homogènes (micas) entre Mankono et Séguéla. Dans le tiers inférieur, les granitoïdes hétérogènes font place à une alternance de granitoïdes subalcalins à deux micas du protérozoïque inférieur et de schistes grauwakeux du birrimien. Au sein de ces formations apparaissent dans la région de Bouaflé des granites intrusifs et des schistes et grès. En outre, des affleurements de migmatites d'origine archéenne sont fréquents sur tout le bassin (Figure 4). (Tagini, 1971 ; Papon, 1973)

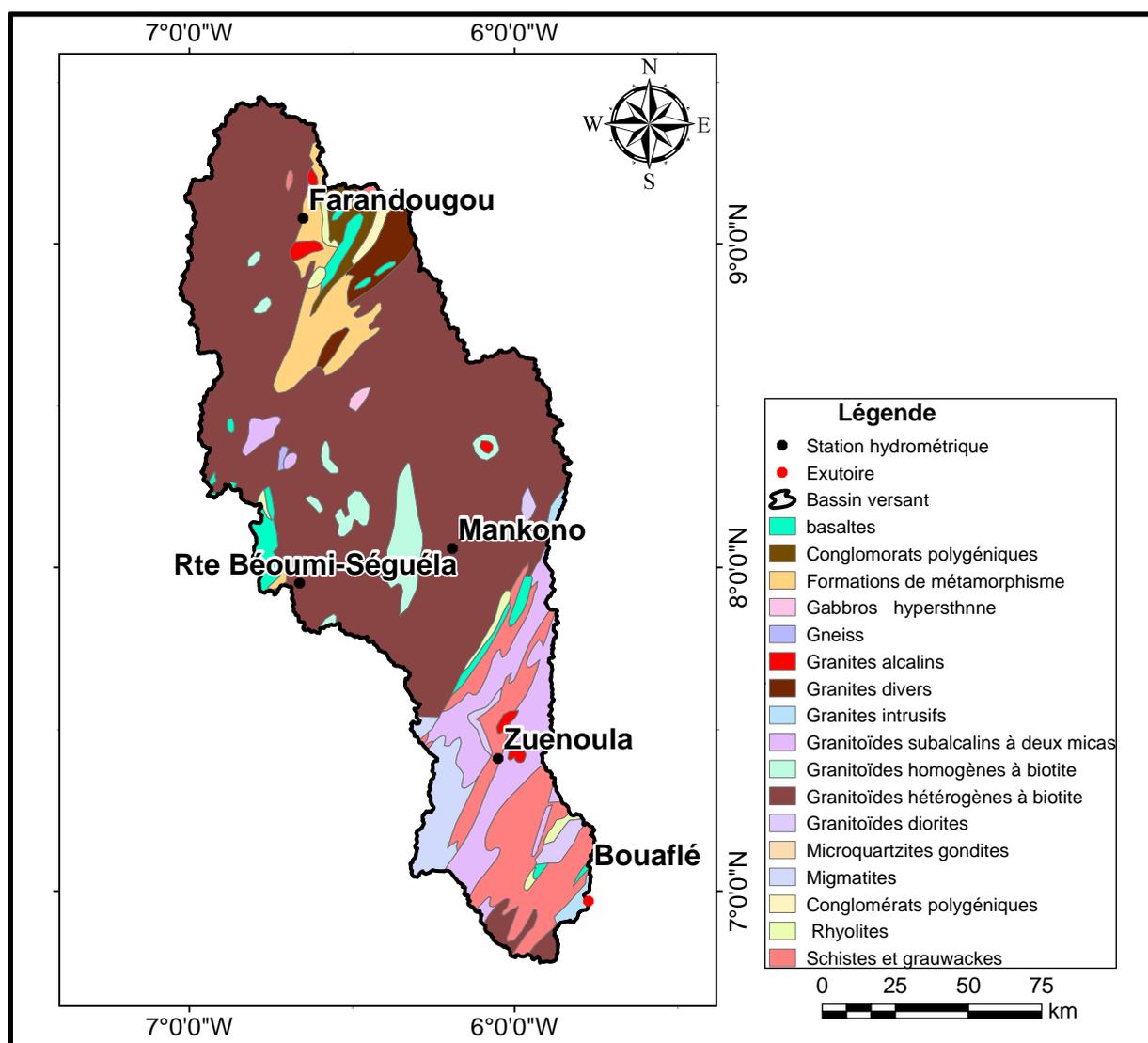


Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de la Marahoué (Tagini, 1971) modifiée

1.1.8 Aperçu hydrogéologique

A travers les travaux de Biémi (1992) et Jourda (2002), deux types d'aquifères s'observent dans le bassin versant de la Marahoué. Ce sont les aquifères d'altérites et les aquifères de fissures (Yao, 2015).

Les réservoirs d'altérites constituent le premier niveau de réservoirs d'eau souterraine en milieu de socle cristallin ou cristallophyllien. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie de sorte que le niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). La baisse du niveau d'eau est due au drainage des eaux souterraines vers les cours d'eaux ou autres surfaces d'eau telles que les lacs, mais aussi les puits et forages exploités (Maréchal *et al.*, 2004).

GENERALITES

Les réserves d'eau dans ces réservoirs sont tributaires de la perméabilité, de l'épaisseur de ces altérites. Dans ces réservoirs d'altérites, les niveaux des arènes grenues constituent les niveaux les plus recherchés. Sur les granitoïdes, ces réservoirs sont composés de haut en bas de cuirasses latéritiques de sables argileux et des arènes grenues dont l'épaisseur peut atteindre 50 m. Ce dernier niveau constitue l'horizon le plus productif dans ces types de réservoirs.

Les aquifères de fissures sous-jacents aux aquifères d'altérites, constituent des réservoirs beaucoup plus importants. Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2003) dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. Contrairement aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution. Pour cela, dans les régions de socle, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités à partir des forages pour l'alimentation en eau des populations. Les possibilités de formation des aquifères de fissures sont liées à la densité et à l'importance de la fracturation de ceux-ci (Sawadogo, 1984 ; Biémi, 1992).

1.2 Généralités sur les étiages

1.2.1 Définition

L'étiage est le débit minimal d'un cours d'eau (Roger, 1993). Il correspond statistiquement à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas. Il intervient pendant une période de tarissement, due à une sécheresse forte et prolongée qui peut être fortement aggravée par des températures élevées favorisant l'évaporation et par des pompages agricoles élevés.

1.2.2 Etiage et basse eau

Dans le dictionnaire simplifié de la géographie, l'étiage est directement assimilé aux basses eaux. Une distinction claire entre ces deux termes doit être faite afin d'éviter des amalgames. Les basses eaux correspondent aux périodes de l'année où les niveaux d'eaux sont bas. Durant la période de basses eaux, le cours d'eau occupe son lit mineur. Il arrive que les étiages apparaissent, sous nos climats, durant la période de basses eaux.

1.2.3 Étiage et sécheresse

La sécheresse est un déficit pluviométrique par rapport à une moyenne. C'est un phénomène naturel caractérisé par un manque d'eau sur une durée suffisamment longue.

Un étiage peut être la conséquence d'une sécheresse, mais à l'inverse de celle-ci, il n'est généralement pas considéré comme un événement exceptionnel (Abi-Zeid & Bobée, 1999).

GENERALITES

Les sécheresses génèrent donc des étiages sévères, bien que la gravité d'une situation ne soit pas fonction unique de l'aléa climatique.

1.2.4 Risques associés à l'étiage

Au moment de l'étiage, divers risques peuvent apparaître (Roger, 1993) :

- les polluants éventuellement rejetés dans les eaux sont plus concentrés ;
- diminution de la recharge des nappes ;
- disparition des organismes aquatiques ;
- manque d'oxygène suite à une augmentation de la température de l'eau ;
- manque d'eau pour l'alimentation en eau potable (AEP).

1.2.5 Période de retour

Une période de retour est une période à laquelle un événement a la probabilité de se reproduire (Meylan *et al.*, 2008). On associe souvent la notion d'étiage à celle de période de retour (étiage décennal, centennal, millénal, etc.). Plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants. On distingue par ordre croissant :

- les étiages fréquents, dont la période de retour est comprise entre un et deux ans ;
- les étiages moyens, dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans ;
- les étiages exceptionnels, dont la période de retour est de l'ordre de cent ans.

1.3 Généralités sur les modèles climatiques

1.3.1 Modèles climatiques globaux (MCG)

Les modèles climatiques globaux sont des représentations mathématiques simplifiées du système climatique fondé sur des lois physiques (Kouakou, 2011). Selon cet auteur, les différentes composantes du système climatique doivent y être représentées (atmosphère, biosphère, hydrosphère et cryosphère) ainsi que leurs processus d'échanges. Ces différents éléments ont été modélisés séparément depuis le début de l'année 70 avant d'être couplés dans les modèles globaux. Les équations mathématiques sont résolues au moyen de grilles tridimensionnelles couvrant la surface du globe (Kouakou, 2011). L'espace est subdivisé en milliers de colonnes permettant de recouvrir la totalité de la surface terrestre et des océans. Les colonnes sont elles-mêmes subdivisées en plusieurs couches (Viner & Hulme, 1998). Selon ces auteurs, les MCG ont typiquement une résolution horizontale comprise entre 250 km et 600 km, de 10 à 20 couches verticales dans l'atmosphère, et parfois jusqu'à 30 couches dans les océans. La fréquence à laquelle les processus sont calculés à l'intérieur du modèle, constitue la résolution temporelle du modèle (Kouakou, 2011).

1.3.2 Modèles climatiques régionaux (MCR)

Les modèles climatiques régionaux sont des représentations mathématiques des processus physiques à petite échelle par rapport aux modèles globaux. Ce sont des modèles numériques semblables aux modèles globaux, mais ils ont une résolution supérieure qui permet une meilleure représentation, par exemple, du relief présent dans le domaine du modèle (Kouakou, 2011). Selon Kouakou (2011), les modèles régionaux commencent la résolution des équations à partir des résultats d'un modèle global qui lui servent de conditions initiales et la plupart des techniques de réduction d'échelle ou "downscaling" sont à sens unique (la simulation avec les modèles climatiques régionaux n'envoie pas de rétroaction vers le MCG directeur). Dans cette étude, le modèle climatique régional RCA4 sera utilisé. Le modèle RCA4 de résolution $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ (soit 49 km x 49 km) concerne des données de climat futur provient du "Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). Le modèle RCA4 est issu du modèle climatique global (CNRM) développé par le Centre Européen de Recherche et de formation Avancée en Calcul Scientifique – Couplé Modèle 5 (CNRM-CERFACS-CM5) (Yéo, 2017). Le tableau I donne des informations sur le modèle RCA4.

Tableau I : Information sur le modèle climatique régional

Institut	MCR	Résolution	Modèle Global	Source
SMHI	RCA4	~50km ($0,44^\circ * 0,44^\circ$)	CNRM	Suédois Météorologique et Hydrologique Institut- Rossby Centre Atmospheric model 4

Ce modèle climatique régionale (RCA4) utilise les scénarios d'émission de gaz (RCP2.6 ; RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5). Dans le cadre de notre étude le MCR sera utilisé suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

1.3.3 Description des scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Les caractéristiques des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont détaillées dans le tableau II, (Yéo, 2017).

GENERALITES

Tableau II : Caractéristiques des scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Composant du scenario	RCP4.5	RCP8.5
Emission de gaz à effet de serre	Très basse Atténuation : faible à moyen	Très élevée
Surface agricole	Très faible	Moyenne
Pollution de l'air	Moyenne	Moyenne à élevée

Le RCP4.5 suppose une mise en œuvre intermédiaire des politiques mondiales en matière des changements climatiques, ce qui se traduira par une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère d'ici 2100. Le RCP8.5, quant à lui, suppose qu'il n'y aura pas d'action internationale efficace sur les changements climatiques avec une forte croissance démographique et des revenus plus faibles dans les pays en développement, ce qui entraînerait des émissions plus élevées (donc des concentrations) de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. Par conséquent, le RCP8.5 devrait être considéré comme un scénario pessimiste, alors que le RCP4.5 constituerait un scénario intermédiaire rendant compte des efforts déployés pour atténuer les changements climatiques (Yéo, 2017).

Conclusion partielle

Le bassin versant de la Marahoué est situé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Au niveau hydrogéologique, le bassin étant situé sur le socle granitique, il présente des aquifères d'altérité et de fissures. Au plan démographique et socio-économique, la population du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est estimée à 409 683 habitants en 2014. Elle est majoritairement agricole et croît en moyenne de 2,30 % annuellement (RGPH, 1998). Ce bassin a un climat de type transitoire atténué avec des températures élevées. Cette croissance de la population et la hausse de la température génèrent une forte pression sur les ressources en eau disponibles à cause de l'absence des précipitations et des prélèvements qui ne cessent d'augmenter. A cet effet, l'élaboration d'une méthodologie permettant de caractériser les étiages du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé s'avère nécessaire. Par conséquent, pour la mise en œuvre de cette méthodologie, un certain nombre de matériels et de méthodes sont présentés dans la deuxième partie de ce mémoire.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel

Le matériel ayant servi à la réalisation de cette étude est constitué de données hydrométriques, de données climatiques et des logiciels.

2.1.1 Données hydrométriques

Les données hydrométriques du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé utilisées dans cette étude ont été mises à notre disposition par la Direction de l'hydrologie (DH). Elles concernent les débits au pas de temps mensuel de 1961 à 1994. Ces données ont permis d'abord, d'estimer les quantiles à différentes périodes de retour, ensuite de déterminer les débits-seuils et enfin d'évaluer les étiages du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

2.1.2 Données climatiques

Les données climatiques de la Marahoué à Bouaflé ont été fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Elles concernent :

- les précipitations au pas de temps mensuel de 1961 à 1994 ;
- les températures au pas de temps mensuel de 1961 à 1994 ;
- les pluies et les températures simulées par le modèle climatique (RCA4) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050.

Ces données nous ont permis d'estimer les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé à l'horizon futur (2021-2050).

2.1.3 Logiciels

Les logiciels utilisés sont :

- **tableur Excel** pour l'organisation des données et les calculs des paramètres statistiques;
- **Hyfran** pour l'estimation des quantiles d'étiages à différentes périodes de retour ;
- **logiciel R** pour l'extraction des données climatiques simulées ;
- **le modèle GR2M** pour la simulation des écoulements dans le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé à l'horizon futur (2021-2050).

2.2 Méthodes

2.2.1 Détermination des débits seuils

2.2.1.1 Variable utilisée

La variable utilisée pour les étiages est le QMNA (débit mensuel minimal annuel) (Lang, 2007 ; Garcia, 2016). Le QMNA est une valeur du débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau sur une année. Il s'exprime en m^3/s . Il est calculé à partir d'une chronique de données. Le

QMNA se calcule à partir des débits mensuels de l'étude, en déterminant le minimal de ces débits sur chaque année. Le minimal de ces débits obtenus correspond au QMNA. Les QMNA déterminés ont été utilisés pour l'analyse fréquentielle.

2.2.1.2 Analyse fréquentielle des débits d'étiage

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique), afin d'en définir les probabilités d'apparition future (Brida, 2005). Cette prédiction passe par une analyse fréquentielle qui repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. Les étapes d'une analyse fréquentielle sont obtenues après un classement par ordre croissant des données chronologiques de QMNA. Le logiciel HYFRAN est utilisé pour ce calcul dont les étapes sont :

❖ Echantillonnage

L'échantillonnage a été mené après extraction des QMNA. Il permet l'obtention d'une collection de valeurs issues d'une variable aléatoire, qui vérifient les hypothèses suivantes (Souanef, 2015) :

- les variables extraites sont homogènes, ou identiquement distribuées (c'est-à-dire qu'elles doivent appartenir à une même population d'évènements).
- les variables choisies sont indépendantes et stationnaires.

• Test d'hypothèse

Une fois l'échantillonnage effectué, on soumet l'échantillon de valeurs à une série de tests statistiques (test d'homogénéité, test d'indépendance et test de Mann-Kendall) afin d'en vérifier l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité, conditions d'un bon ajustement.

• Test d'homogénéité

Le test de Wilcoxon est le test qui a été utilisé pour vérifier l'homogénéité de l'échantillon des données de la station de la Marahoué à Bouaflé. Il permet d'effectuer des comparaisons entre deux sous-échantillons et de vérifier si leurs moyennes sont significativement différentes.

• Test d'indépendance

MATERIEL ET METHODES

Une série de données est dite indépendante si chaque donnée n'est pas influencée par la donnée qui la précède. Le test non paramétrique qui a été utilisé pour vérifier l'hypothèse d'indépendance des observations de la station de la Marahoué à Bouaflé est le test de Wald-Wolfowitz.

- **Test de Mann-Kendall**

Les données composant une série sont dites stationnaires si leurs caractéristiques statistiques (moyenne, variance ou moments, etc.) ne varient pas en fonction du temps. Le test qui a été utilisé pour procéder à la vérification de l'hypothèse de stationnarité est le test de Mann Kendall.

- ❖ **Choix du modèle d'ajustement**

Plusieurs techniques d'approche permettent d'effectuer le choix du modèle d'ajustement à savoir : les considérations théoriques, la comparaison du comportement asymptotique des lois, les habitudes locales, les tests d'adéquation et aussi l'utilisation de divers diagrammes (Souanef, 2015).

Dans cette étude, le choix du modèle fréquentiel s'est fait au moyen de deux approches que sont l'approche graphique et celle des critères de comparaison (AIC et BIC). Ce choix est opéré parmi cinq (5) modèles fréquents (lois statistiques). Il s'agit de : la loi logPearson de type 3, la loi log normale à 2 et 3 paramètres, la loi de Weibull et la loi de Gamma (Tasker, 1987 ; Vogel & Kroll, 1989). La méthode du maximum de vraisemblance et des moments a été utilisée pour l'estimation des paramètres de ces lois. L'application de ces lois permet d'apprécier celle qui s'adapte au mieux à une série chronologique de débits. L'observation des graphiques d'ajustements suggère que le meilleur modèle soit celui dont la courbe englobe le maximum de points pour un intervalle de confiance 95%. Nous pouvons décrire ces tests comme suit :

- **Critères de comparaison**

Le but de ces critères est de rechercher un compromis entre une paramétrisation suffisante pour bien ajuster une loi de probabilité aux observations, et une paramétrisation la moins complexe possible. Pour comparer les modèles probabilistes par critère de comparaison, l'on se fixe des probabilités à priori égales pour toutes les distributions. Ensuite, on spécifie une période de retour (T) (Soro, 2011). Le Critère d'Information Bayésien (BIC) et le Critère d'Information d'Akaike (AIC) sont aussi calculés. Le meilleur modèle probabiliste est celui dont les valeurs de AIC et BIC sont faibles et la probabilité à posteriori la plus élevée (Brida, 2005). Les critères BIC et AIC sont définis à travers l'équation 1 et 2 :

$$AIC = -2\log(l) + 2k\log(n) \quad (\text{Éq.1})$$

$$BIC = -2\log(l) + 2k \quad (\text{Éq. 2})$$

Avec (l) : la vraisemblance, (k) : nombre de paramètre, (n) : taille de l'échantillon.

- **Tests de validation du modèle**

Une fois le modèle d'ajustement choisi, il doit être soumis à une série de tests afin de vérifier son adéquation à l'échantillon choisi. Le test de khi-deux (χ^2) a été ainsi utilisé. C'est un test non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse H_0 selon laquelle les données observées sont engendrées par un modèle faisant intervenir une loi de probabilité, ou une famille de probabilité. Leurs principes sont les suivants : la loi de χ^2 est une loi à un paramètre n définie pour $x > 0$; l'expression de sa densité est la suivante (Eq.3):

$$f(x, n) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}} \quad (\text{Éq.3})$$

où Γ : est la fonction Gamma classique et n est le nombre de degrés de liberté.

Son origine : c'est la loi de la somme des carrés de n variables normales centrées réduites.

Le principe est le suivant :

On définit une fonction discriminante D_n qui constitue une mesure normalisée de l'écart entre les valeurs théoriques déduites du modèle et les valeurs observées dans l'échantillon. Lorsque H_0 n'est pas vraie, les effectifs de D_n augmentent et lorsque H_0 est vraie, D_n suit au moins asymptotiquement, une loi du χ^2 à un degré de liberté.

La statistique du test se traduit par l'équation 4 :

$$D^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \quad (\text{Éq. 4})$$

Où np_i : valeur théorique de l'effectif espéré de la classe i en n observations, sous l'hypothèse H_0 ;

N_i étant le nombre d'observations appartenant à la classe i .

La statistique D_n représente une mesure normalisée de l'écart global entre les valeurs observées et les valeurs théoriques (Souanef, 2015).

2.2.1.3 seuil de vigilance et de crise

La détermination des débits-seuils repose sur les recommandations du plan de sécheresse (Lang, 2011). Ce plan fixe un cadre national de gestion de la ressource en eau. Il permet de prendre des mesures préventives pour anticiper d'éventuelles catastrophes liées à l'eau et aux événements hydrologiques exceptionnels. Il définit notamment les débits-seuils (débits limites) qui correspondent au seuil en dessous duquel les mesures de restrictions doivent être prises.

Selon Lang (2011) et Garcia (2016), la variable usuellement employée par les services gestionnaires des cours d'eau est le QMNA(5). Il s'agit du débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans. Le QMNA de fréquence (0,25) constitue une valeur réglementaire prescrite par la loi française sur l'eau du 3 janvier 1992 pour calculer les dispositifs de rejets et prélèvements en rivière. Le plan de sécheresse repose sur les points suivants.

❖ Seuil de vigilance

Le seuil de vigilance se traduit à travers l'équation 5 :

$$\text{Seuil de vigilance} = 1,1 \times \text{QMNA}(5)$$

(Éq.5)

❖ Seuil de crise

Le seuil de crise se traduit à travers l'équation 6 :

$$\text{Seuil de crise} = 0,9 \times \text{QMNA}(5)$$

(Éq.6)

2.2.2 Evaluation des étiages

Le tableau III donne les valeurs caractéristiques des étiages de la station de la Marahoué à Bouaflé.

Tableau III : Etiage caractéristique de la rivière Marahoué à Bouaflé

(Girard et al., 1970)

Etiage (m ³ /s) en année			Etiage spécifique (l/s.km ²) en années			K ₃	Surface (km ²)
Sec	Moyen	Humide	Sec	Moyen	Humide		
0,20	0,4	4,0	0,01	0,02	0,2	20	19 800

A partir des chroniques de débit de notre station hydrométrique, on compare les QMNA aux débits caractéristiques des étiages de la station.

Si

- $QMNA \geq 0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $0,01 \text{ l/s/km}^2$: étiage sec
- $QMNA \geq 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $0,02 \text{ l/s/km}^2$: étiage moyen
- $QMNA \geq 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $0,2 \text{ l/s/km}^2$: étiage humide

2.2.3 Simulation des débits d'étiage à l'horizon futur (2021-2050)

La méthode employée pour étudier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau est constituée de quatre étapes (Kouakou, 2011) :

- (1) la préparation des données d'entrée et de sortie du modèle ;
- (2) le calage et la validation du modèle conceptuel GR2M avec les données observées ;
- (3) la construction de séries climatiques réalistes (pluies et température) pour l'horizon 2021-2050 à partir des données climatiques effectivement observées sur la période de référence (1961-1994) et celles simulées sur la période 2021-2050 ;
- (4) Simulation des écoulements à l'aide du modèle conceptuel GR2M à partir des paramètres calés à l'étape (2) et des séries chronologiques construites à l'étape (3).

2.2.3.1 Description, structure et fonctionnement de GR2M

Le modèle GR2M (Modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été mis en place par le Cemagref (Makhlouf & Michel, 1994 ; Yao, 2015). Il a connu plusieurs versions proposées successivement par Kabouya & Michel (1991), Makhlouf & Michel (1994), Mouelhi (2003), Mouelhi *et al.* (2006) et Yao (2015), qui ont permis d'améliorer progressivement sa performance. La structure du modèle, bien qu'empirique, s'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. La version utilisée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006). La structure de ce modèle est présentée par la figure 6. Le mode de fonctionnement général est le suivant :

- une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct ;
- le niveau d'eau dans le réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la fraction de pluie restante et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle ;

MATERIEL ET METHODES

- une vidange progressive de ce stock d'eau produit l'écoulement retardé. Les deux paramètres à caler sont notés X1 et X2.
- X1 est le paramètre de réglage de la fonction de production et s'exprime en mm. Il représente la capacité en eau maximale du réservoir sol (réservoir de production). La fonction de production met en évidence la répartition de l'eau précipitée entre les différents termes du bilan hydrique. Elle permet essentiellement de déterminer l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement superficiel et la partie de l'eau qui transite par la fonction de transfert appelée "eau gravitaire".
- X2 est le paramètre de réglage de la fonction de transfert du modèle. C'est donc un coefficient d'échanges souterrains. La fonction de transfert contrôle la répartition temporelle de l'eau qui alimente l'écoulement. Il est sans unité.

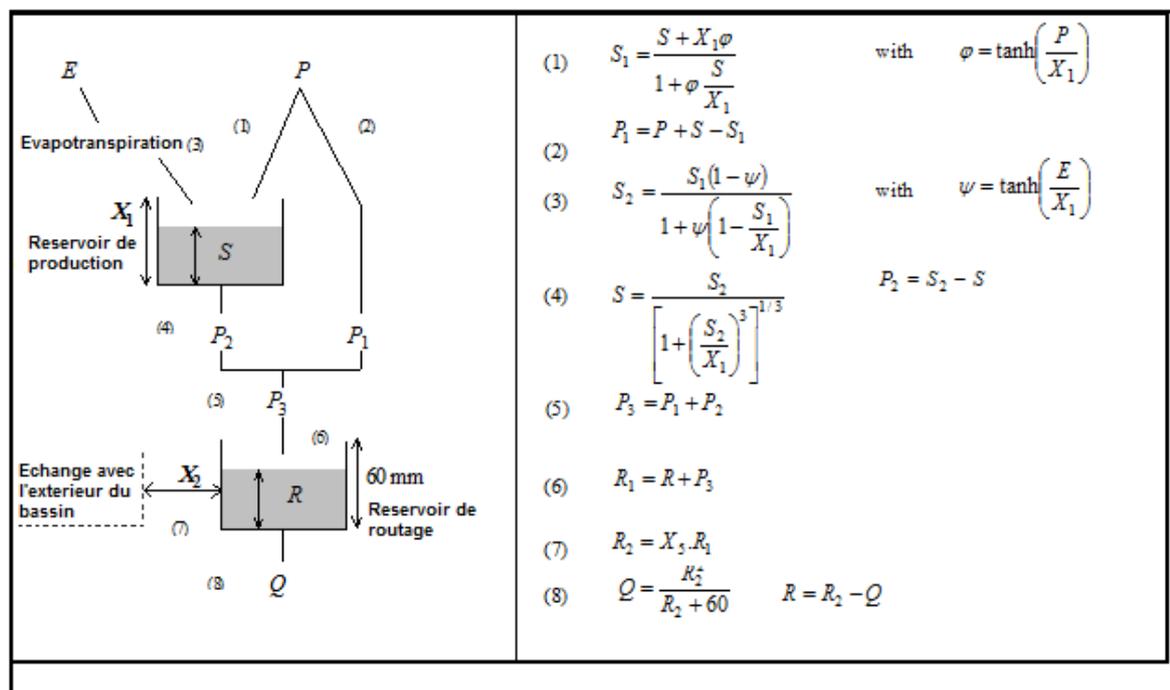


Figure 6 : Structure et fonctionnement du modèle GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006)

Dans cette zone, les caractéristiques du sol (perméabilité et structure) permettent d'assimiler la capacité de rétention en eau du réservoir sol du modèle hydrologique GR2M à la capacité en eau du sol (Yéo, 2017). Ainsi nous prenons :

- la capacité du réservoir de production initiale $S_0 = 200$;
- la capacité du réservoir de routage initial $R_0 = 20$.

2.2.3.2 Critère d'optimisation du modèle

La mesure de performances d'un modèle se fait selon les objectifs qu'on se fixe, et par conséquent, le critère qu'on choisit. Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons, l'unique contrainte étant l'objectif du jugement, le critère le plus connu et le plus utilisé pour les modèles conceptuels est le critère de Nash & Sutcliff (1970) qui s'exprime par l'équation (7).

$$Nash(Q) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_i (Q_0^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_0^i - Q_m^i)^2} \right] \quad (\text{Éq.7})$$

avec :

Q_0^i : débit mensuel observé

Q_c^i : débit mensuel calculé

Q_m^i : débit moyen mensuel observé sur l'ensemble de la période d'observation

La performance du modèle est jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash (Perrin, 2000):

- Nash \geq 90 % : le modèle est excellent ;
- 80 % < Nash < 90 % : le modèle est très satisfaisant ;
- 60 % < Nash < 80 % : le modèle est satisfaisant ;
- Nash < 60% : le modèle est mauvais.

Le modèle est considéré comme performant, quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash est proche de 100 %. On peut affirmer qu'un critère de moins de 60 % ne donne pas une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle.

2.2.3.3 Calage et validation du modèle GR2M

Le calage et la validation ont pour but d'ajuster les paramètres du modèle de façon à ce que l'adéquation entre les débits simulés et observés soit maximale. La méthodologie consiste à subdiviser la période d'observation en périodes de calage et de validation. Toutefois, il faut réserver une période de mise en route. Les paramètres d'entrée sont l'ETP, la pluie et le débit.

2.2.3.4 Simulation des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 dans le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé

Une fois les nouvelles séries climatiques futures générées, elles sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M pour produire les écoulements attendus à l'horizon 2021-2050.

Mais avant la simulation, on calcule les données de l'évapotranspiration (ETP) à partir des données de températures simulées par le modèle climatique (RCA4) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050.

L'ETP est calculé par la méthode de Thornthwaite (1950). Elle nécessite la température moyenne mensuelle et les données de pluviométries mensuelles.

La valeur mensuelle est calculée par l'équation 8 :

$$ETP = 1,6\left(\frac{10t}{I}\right)^a F(\lambda) \quad (\text{Éq. 8})$$

avec :

t : température moyenne de la période considérée (°C)

a : fonction complexe de l'indice I

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

I : Indice thermique annuel égal à la somme des 12 indices mensuels i (éq. 9).

$$I = \sum_1^{12} i \quad (\text{Éq. 9})$$

Chaque indice thermique mensuel est calculé selon la formule (éq. 10) :

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{Éq. 10})$$

F (λ) = Facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et est donné par les tables de Gerbier (Tableau IV).

MATERIEL ET METHODES

Tableau IV : **Tables de Gerbier**

Latitude	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
0°	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
10°	1	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
15°	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97

Après avoir calculé les données de l'évapotranspiration, on utilise les données de pluie et d'évapotranspiration pour la simulation des écoulements futurs.

Pour rendre possible la simulation des écoulements futurs, l'on garde constant les paramètres ayant servi au calage et à la validation sur les périodes de références. En effet, le modèle hydrologique nécessite certes des données climatiques, mais aussi les données de capacité en eau du sol.

Conclusion partielle

Pour cette étude, des données climatiques (pluies, températures) et hydrométriques ont été nécessaires. La variable utilisée pour le calcul des étiages a été le QMNA. Les débits d'étiage à différentes périodes de retour ont été estimés à l'aide du logiciel Hyfran. Les débits seuils du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé ont été déterminés par le plan de sécheresse. L'évaluation des débits d'étiage s'est fait par comparaison aux étiages caractéristiques de Côte d'Ivoire. Les débits d'étiage à l'horizon futur ont été simulés par le modèle GR2M sur la période 2021-2050. L'application de toutes ces méthodes a produit des résultats qui sont présentés, analysés et discutés dans la troisième partie de cette étude.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Estimation des débits d'étiage à différentes périodes de retour

3.1.1.1 Valeurs des QMNA

Les différentes valeurs du QMNA déterminées à partir de notre série de données (données hydrométriques) sont représentées dans le tableau V.

Tableau V : Valeurs des QMNA de 1961 à 1994 du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

Années	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
QMNA (m ³ /s)	0,346	0,367	7,728	3,711	5,997	1,455	0,698
Années	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
QMNA (m ³ /s)	1,054	1,373	1,756	2,163	0,440	0,219	0,228
Années	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
QMNA (m ³ /s)	0,691	0,964	0,241	0,518	0,021	16,831	0,913
Années	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
QMNA (m ³ /s)	0,989	0,620	0,410	0,251	0,822	0,370	0,272
Années	1989	1990	1991	1992	1993	1994	
QMNA (m ³ /s)	0,210	1,850	2,992	0,310	0,210	0,174	

L'analyse de ces résultats montre que le minimum des valeurs de la série de débits obtenu est de 0,021 m³/s et le maximum des valeurs est de 16,831 m³/s. Le coefficient d'asymétrie positif pour la station, permet de dire que les données des débits d'étiage sont étalées à droite de la moyenne. Le coefficient de variation est largement supérieur à 25 %, ce qui traduit une variation importante des débits d'étiage d'une année à une autre. Le tableau VI présente les résultats des caractéristiques statistiques issus de l'analyse fréquentielle.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VI : Caractéristiques statistiques des débits d'étiage de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994)

Minimum (m ³ /s)	Maximum (m ³ /s)	Moyenne (m ³ /s)	Ecartype (m ³ /s)	C _v	C _s
0,02	16,83	1,68	3,15	1,87	3,84

C_s : coefficient d'asymétrie, (C_v) : coefficient de variation

La figure 7 montre la variation des débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

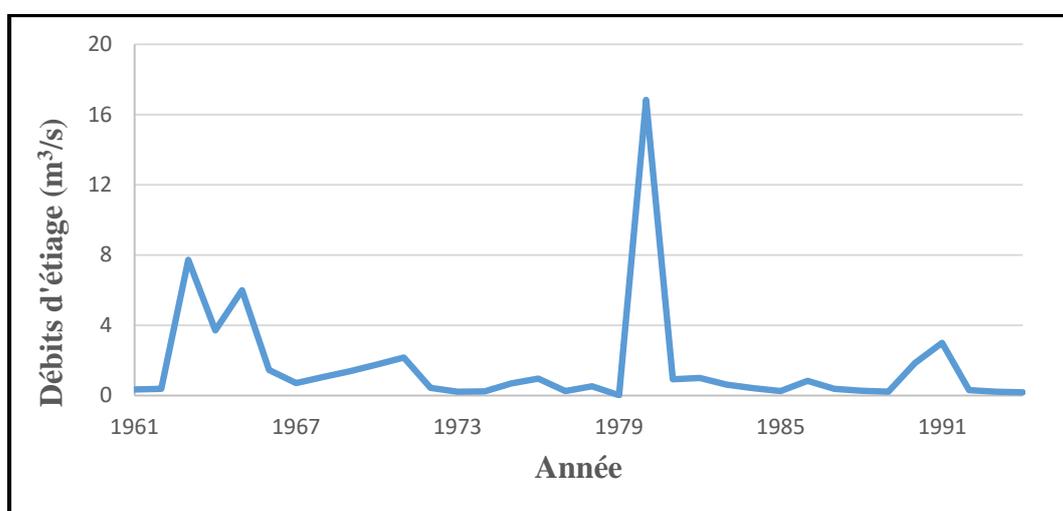


Figure 7 : Evolution chronologique des débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (1961-1994)

La figure 7 présente l'évolution des débits d'étiage de 1961 à 1994. Ces débits varient d'une année à une autre. Le pic de ces débits est de 16,831 m³/s et le minimal est 0,021 m³/s respectivement aux années 1980 et 1979.

3.1.1.2 Analyse fréquentielle des quantiles d'étiage

Les résultats obtenus par le critère de comparaison graphique sont présentés par les figures 8 et 9. D'après l'examen visuel par la méthode graphique, la loi lognormale à deux paramètres présente l'avantage d'être un modèle simple pour cette station dont les valeurs des QMNA sont bien corrélées à cette loi qui met en évidence un bon comportement comparé aux autres lois.

RESULTATS ET DISCUSSION

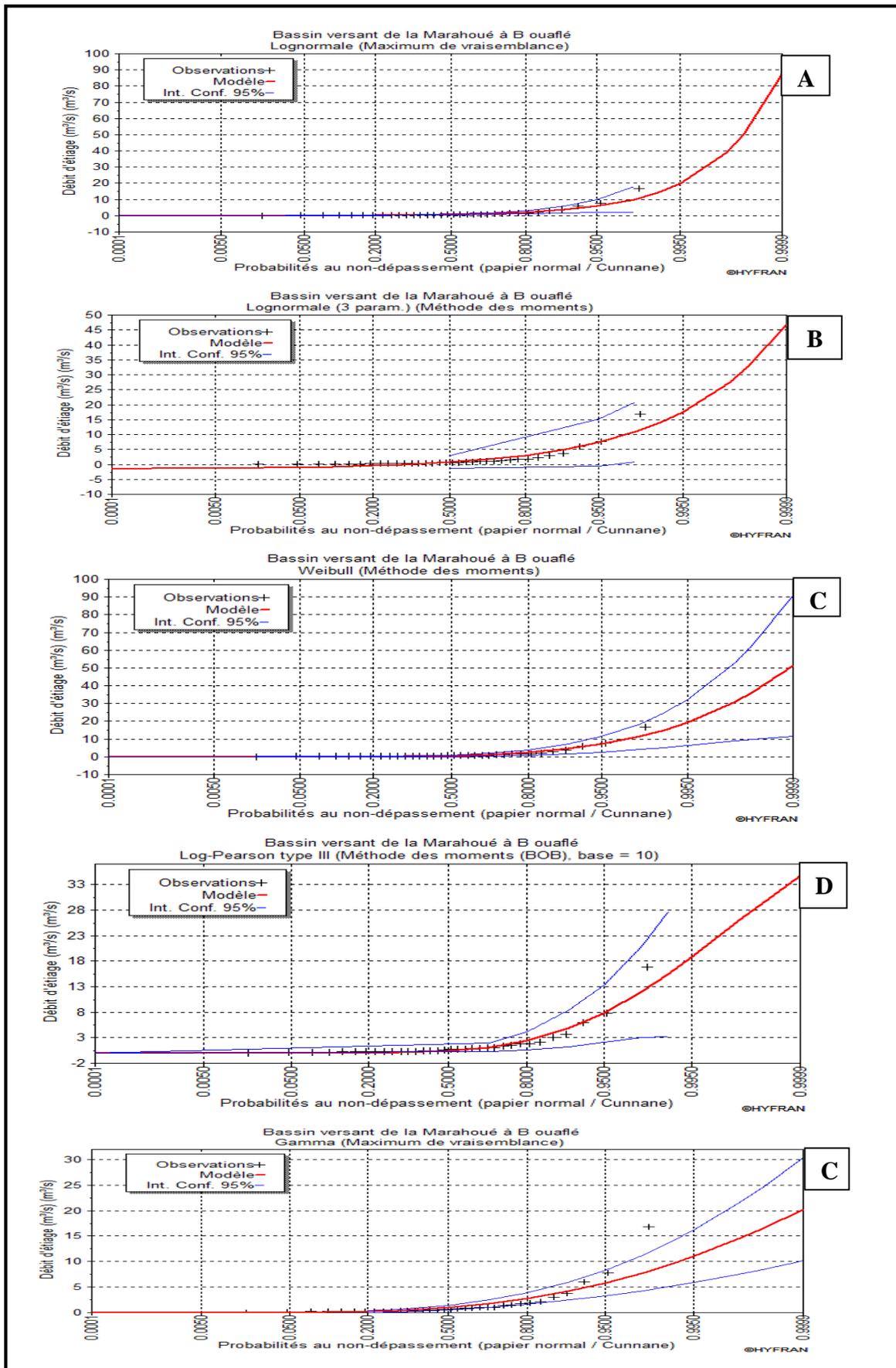


Figure 8 : Modèle d'ajustement aux séries des débits d'étiage

RESULTATS ET DISCUSSION

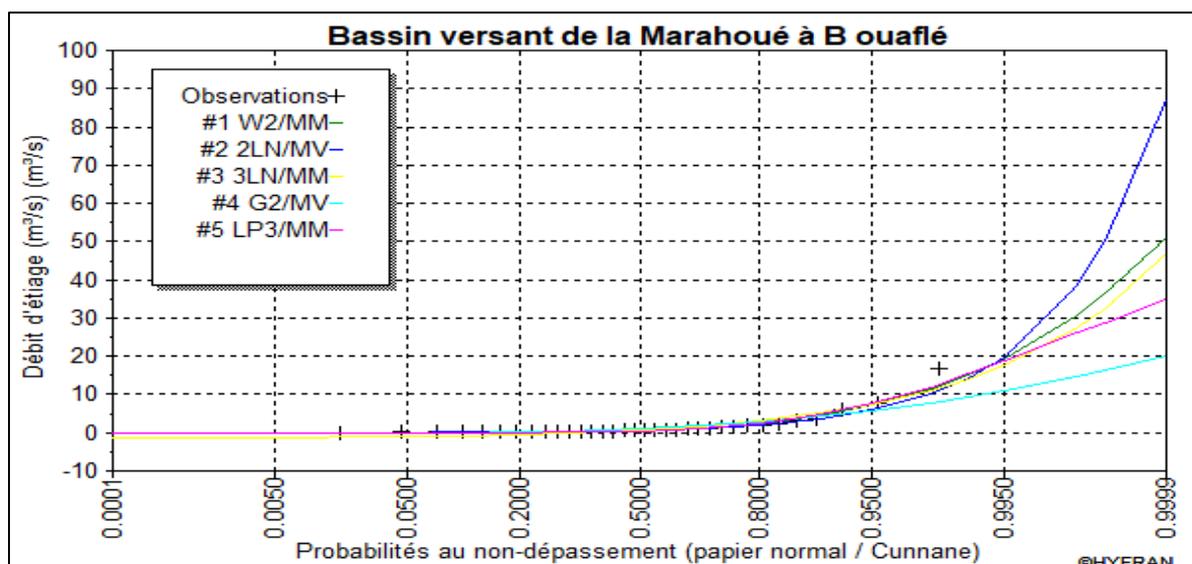


Figure 9 : Critère de comparaison graphique

Le tableau VII présente le classement des lois ajustées aux séries des débits d'étiage. D'après les critères de comparaison, c'est la loi lognormale (2 paramètres) qui s'ajuste bien aux modules de la station de la Marahoué à Bouaflé.

En effet, les critères d'information Akaike et Bayésien (AIC et BIC) permettent de retenir la loi lognormale (Tableau VII). Cette loi est arrivée en tête parmi toutes les lois mises en compétition avec la plus grande probabilité à posteriori $P(M_i/X) = 99,34$ et les plus faibles valeurs de critères de AIC et BIC qui sont respectivement de 92,718 et 95,771.

Tableau VII : Comparaison des lois statistiques pour l'ajustement des modules du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé

Modèles	NP	P (Mi)	P (Mi/x)	BIC	AIC
Lognormale (Maximum de vraisemblance)	2	20	99,34	95,771	92,718
Gamma (Maximum de vraisemblance)	2	20	0,41	106,736	103,683
Weibull (Méthode des moments)	2	20	0,24	107,809	104,756
Log-Pearson type III (Méthode des moments (BOB), base = 10)	3	20	0	115,657	111,078
Lognormale (Méthode des moments)	3	20	0	140,761	136,182

NP : Nombre de Paramètre ; P (Mi) : Probabilité A priori ; P (Mi/x) : Probabilité A posteriori ; BIC : Critères d'Information Bayésien ; AIC : Critères d'Information Akaike

RESULTATS ET DISCUSSION

Les quantiles d'étiage pour diverses périodes de retour sont consignés dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Quantiles d'étiage et périodes de retour

T (ans)	F	XT (m³/s)	Ecart-type (m³/s)	Intervalle de confiance (95%)
50	0,02	0,048	0,019	[0,010 - 0,086]
20	0,05	0,082	0,028	[0,027 - 0,138]
10	0,1	0,132	0,039	[0,054 - 0,21]
5	0,2	0,233	0,060	[0,114 - 0,353]
2	0,5	0,697	0,155	[0,392 - 1]

T : Période de retour ; F : Fréquence de non dépassement ; XT : Débit d'étiage

On remarque que les débits d'étiages estimés par la Lognormale (2 paramètres) diminuent au fur et à mesure que les périodes de retour augmentent. Pour une période de retour de 2 ans, le débit d'étiage est de 0,5 m³/s par contre, pour une période de retour de 50 ans le débit d'étiage est de 0,02 m³/s.

3.1.2 Seuils d'étiage

Les seuils de vigilance et de crise du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé sont consignés dans le tableau IX.

Tableau IX : Débits-seuils d'étiage

Seuil de vigilance (m³/s)	Seuil de crise (m³/s)
0,256	0,209

Les seuils de vigilance et de crise qui correspondent respectivement à un niveau de prévention des problèmes de pénurie d'eau et à un niveau de préparation à une éventuelle crise.

Lorsque le débit d'étiage atteint le seuil de vigilance et de crise, un comité de suivi de la situation est mis en place par le préfet coordonnateur de bassin en vue d'assurer les usages prioritaires, en particulier l'alimentation en eau potable et la préservation des milieux aquatiques. Les premières mesures pouvant être prises au seuil de vigilance sont la mise en place d'un observatoire départemental de la sécheresse, la sensibilisation des usagers aux règles

RESULTATS ET DISCUSSION

de bon usage et d'économie de l'eau, la mise en place d'une concertation avec les utilisateurs et les acteurs économiques.

En période de crise, les premières mesures de restriction sont prises et concernent des restrictions d'usagers et d'horaires, la réduction des débits d'entrée aux prises des canaux, l'interdiction des prélèvements qui ne sont pas indispensables pour les économiques ou l'alimentation en eau potable, L'interdiction de tous les usages non prioritaires et les restrictions au minimum des prélèvements pour l'alimentation en eau potable (afin de ne pas épuiser totalement la ressource disponible et pour préserver un état acceptable des milieux aquatiques).

3.1.3 Evaluation des étiages

Le tableau X présente les classes d'étiage de 1961 à 1994 du bassin versant de Marahoué à Bouaflé.

Tableau X : Classification des étiages

Années	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Etiage	-	-	++	+	++	+	+
Années	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Etiage	+	+	+	+	+	-	-
Années	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
Etiage	+	+	-	+	-	++	+
Années	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Etiage	+	+	+	-	+	+	-
Années	1989	1990	1991	1992	1993	1994	
Etiage	-	+	+	-	-	-	

avec - : étiage sec, + : étiage moyen et ++ : étiage humide

RESULTATS ET DISCUSSION

Le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé de 1961 à 1994 a connu des étiages moyens à l'exception des années 1961, 1962, 1973, 1974, 1977, 1979, 1985, 1988, 1989, 1992, 1993 et 1994 qui ont eu des étiages secs et des années 1963, 1965 et 1980 qui eut des étiages humides.

3.1.4 Simulation des débits d'étiage à l'horizon futur

3.1.4.1 Calage et validation du modèle

Le modèle a été calé et validé sur plusieurs périodes parmi lesquelles nous avons retenu la meilleure période c'est-à-dire celle qui présente le meilleur critère de Nash au calage et à la validation. Ainsi les périodes retenues sont 1970-1975 pour le calage et 1978-1985 pour la validation Bouaflé (Tableau XI).

Tableau XI : Résultats du calage et validation du modèle hydrologique GR2M

Paramètres		Calage		Validation	
X1	X2	Période	Nash (%)	Période	Nash (%)
7,21	0,41	1970-1975	75	1978-1985	62

Le calage du modèle GR2M donne un résultat satisfaisant pour le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé. Le critère de Nash obtenu lors du calage du modèle avec les données de la station hydrométrique de Bouaflé est de 75 %. La validation a donné un résultat également satisfaisant avec un critère de Nash 62 %. Les figures 10 et 11 présentent les hydrogrammes des débits observés et simulés au calage et à la validation. L'analyse des graphes obtenus lors de cette simulation montre que la dynamique des écoulements est respectée.

RESULTATS ET DISCUSSION

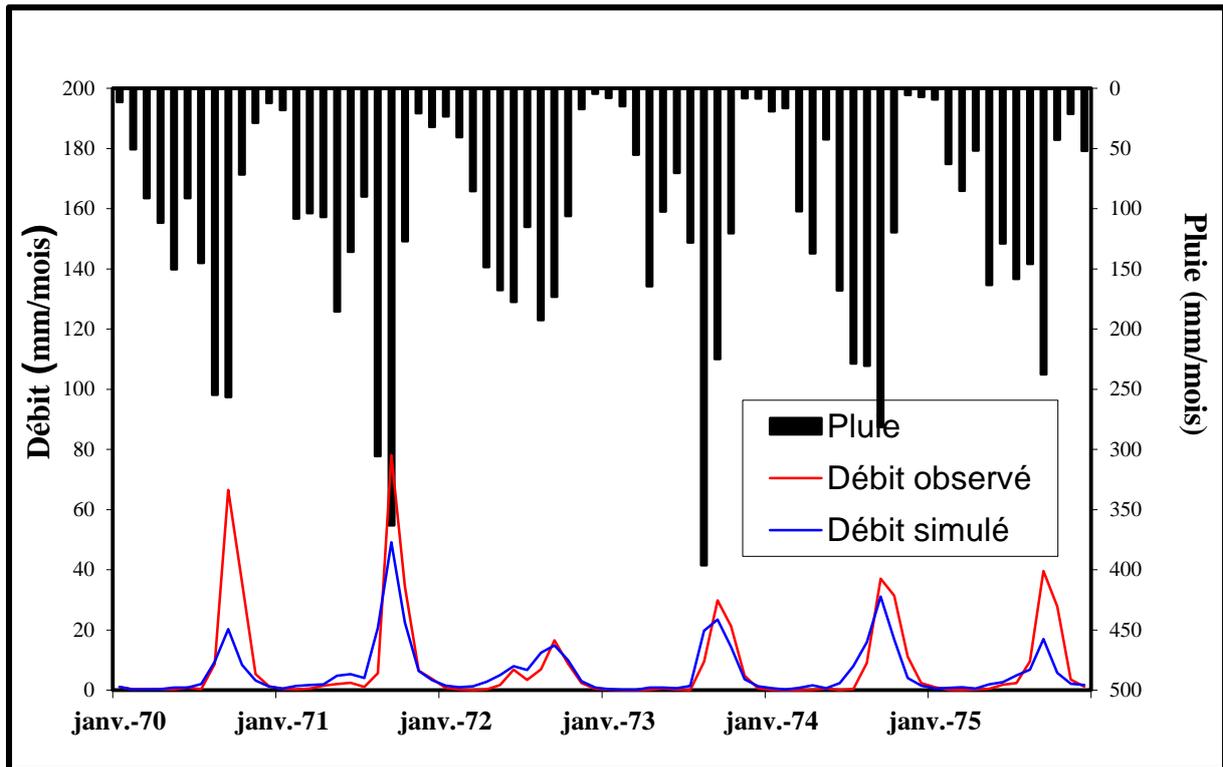


Figure 10 : Débit observé et simulé pendant la période de calage

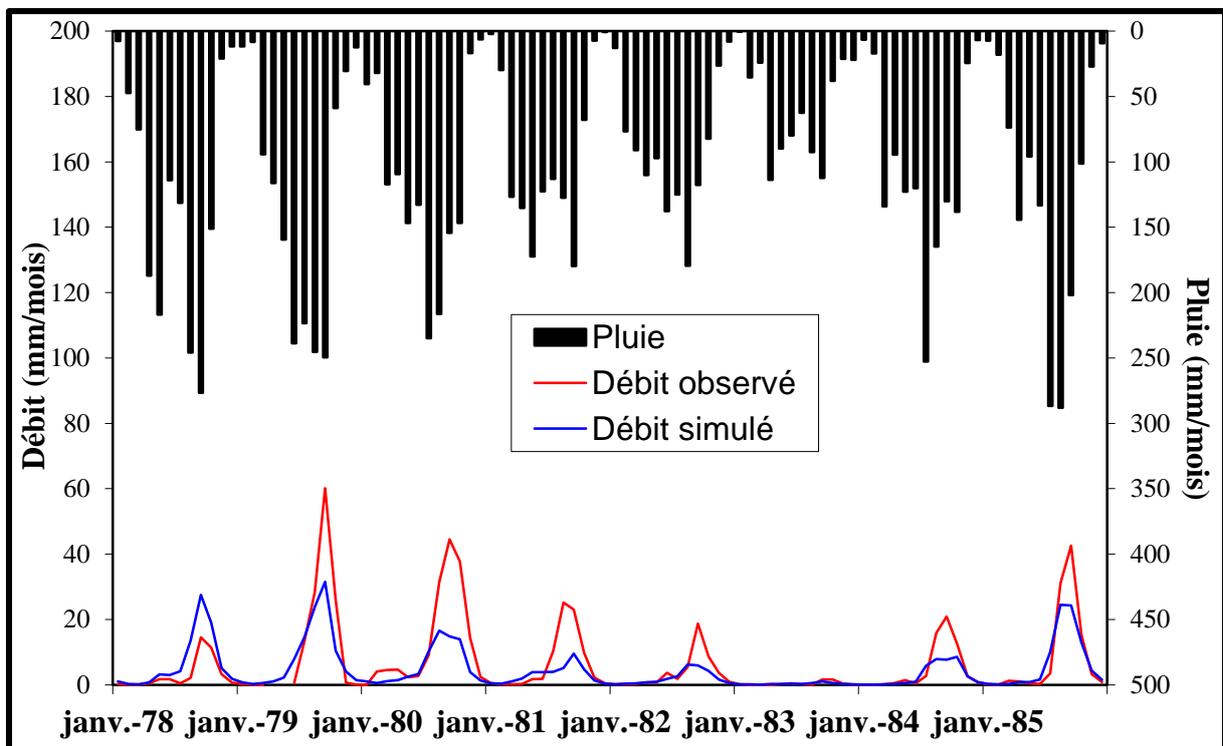


Figure 11 : Débit observé et simulé pendant la période de validation

3.1.4.2 Simulation des écoulements à l'horizon 2021-2050

Les figures 12 et 13 montrent l'évolution des écoulements à l'horizon 2021 à 2050.

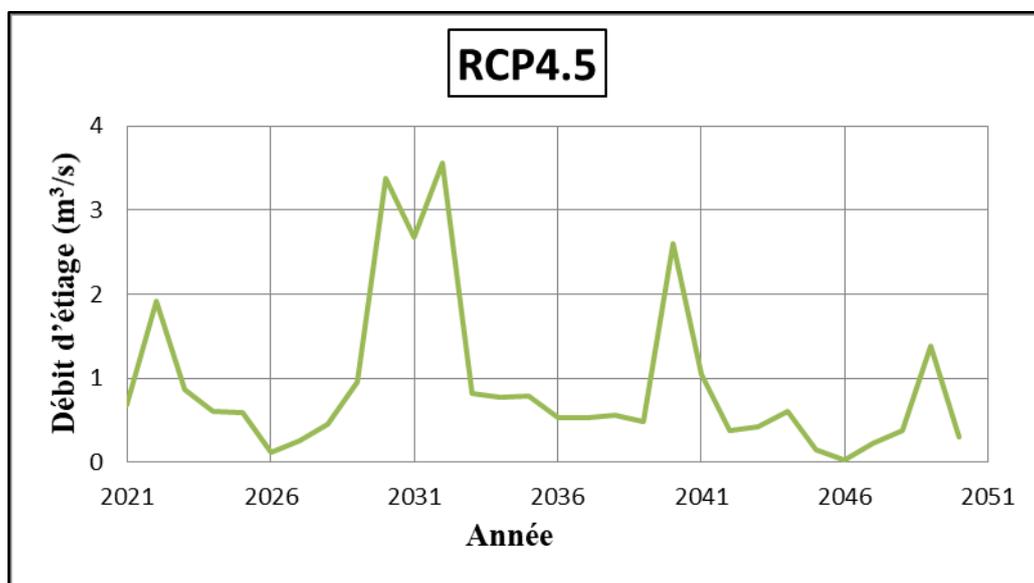


Figure 12 : Evolution des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 par RCP4.5

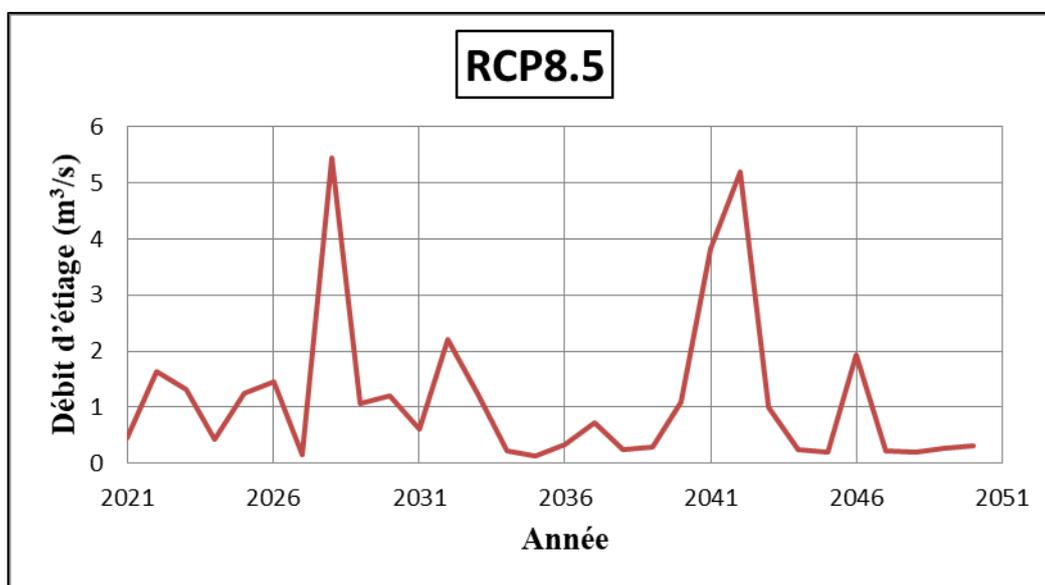


Figure 13 : Evolution des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 par RCP8.5

La simulation des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 prévoit une diminution des débits d'étiage par rapport à la période 1961-1994. Ces débits sont enregistrés aux mois de mars, avril et mai. Dans le cas du scénario RCP4.5, le maximum et le minimum de ces débits sont 3,55 m³/s et 0,33 m³/s respectivement en années 2032 et 2046. Par contre, avec le scénario RCP8.5,

RESULTATS ET DISCUSSION

le maximum et le minimum de ces débits sont $5,44 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement en années 2028 et 2035.

3.2 Discussion

L'analyse des QMNA du bassin versant de la Marahoué a montré une variation importante des débits d'étiage de 1961 à 1994. Ces débits d'étiage varient entre $0,021 \text{ m}^3/\text{s}$ et $16,831 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela semble être dû à la position géographique du bassin versant et à la variabilité pluviométrique (Kouassi *et al.*, 2018). Certains auteurs tels que Goula *et al.* (2006) ont démontré que cette variation des débits d'étiage est due à la variabilité climatique qui occasionne une baisse des précipitations et la hausse de la température de l'air (température pouvant atteindre 28°C voir même 33°C).

Une analyse fréquentielle a été menée afin d'estimer les quantiles d'étiage de la Marahoué à Bouaflé. Les lois statistiques appliquées sont : la loi lognormale à deux paramètres, loi lognormale à trois paramètres, la loi de Weibull, la loi log-Pearson de type III et la loi de Gamma. D'après les critères de comparaison, c'est la loi lognormale à deux paramètres qui s'ajuste mieux pour les étiages avec un intervalle de confiance de 95 % parce qu'elle a été acceptée par les différents tests appliqués. Ces résultats sont conformes à ceux de Meigh *et al.* (2002) pour une étude réalisée sur les étiages dans le bassin versant du Bandaman blanc.

Les débits caractéristiques d'étiage (QMNA-5 ans) ont donc été déterminés au moyen des quantiles évalués à partir de la station hydrométrique de Bouaflé. Les débits seuils de crise et de vigilance sont respectivement $0,209 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,256 \text{ m}^3/\text{s}$. A travers les études réalisées sur le bassin versant du Bandaman blanc par Kouassi *et al.* (2018), le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé a des débits-seuils inférieurs à ceux des stations hydrométriques de Fétékro et M'Bahiakro à l'exception des stations hydrométriques de Bocanda, Dimbokro et N'Zianouan du bassin versant du Bandaman blanc. Les débits de seuils de crise et de vigilance évalués montrent que le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé nécessite un suivi hydrologique beaucoup plus accentué en période d'étiage. Cette différence peut s'expliquer par le régime pluviométrique du bassin versant du Bandaman blanc. En effet, il s'agit d'un climat tropical de transition avec des précipitations plus faibles (Kouassi *et al.*, 2018).

Le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé de 1961 à 1994 a connu des étiages moyens à l'exception des années 1961, 1962, 1973, 1974, 1977, 1979, 1985, 1988, 1989, 1992, 1993 et 1994 qui ont eu des étiages secs et des années 1963, 1964 et 1980 qui ont eu des étiages

RESULTATS ET DISCUSSION

humides. En effet, les débits d'étiage sont très irréguliers d'une année à une autre car ils dépendent de l'abondance de la saison des pluies. Plus les précipitations sont abondantes dans l'année, les débits d'étiage sont humides (Girard *et al.*, 1970).

A la lumière des résultats du calage et de la validation, il ressort que le modèle GR2M produit, dans l'ensemble, des performances satisfaisantes. Les critères de Nash obtenus en calage (1970-1975) et en validation (1978-1985) sont respectivement 75 % et 62 %. Cependant, plusieurs auteurs dont Perrin (2000) et Kouakou (2011) ont montré une dégradation des valeurs de Nash en passant du calage à la validation. A cet effet, il faut dire que le modèle GR2M ne tient pas compte des paramètres physiques du milieu. D'ailleurs, des études réalisées sur le bassin versant de la rivière Davo ont montré différentes valeurs de Nash en calage et validation. Le modèle GR2M calé et validé sur la période d'observation a permis d'effectuer les simulations sur la période 2021-2050.

Les résultats des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 ont montré une baisse des débits d'étiage comparée à la période de référence 1961-1994. Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 prévoient respectivement une variation des débits d'étiage de 0,03 m³/s à 3,55 m³/s et de 0,14 m³/s à 5,44 m³/s. Cette différence de débits entre les deux scénarios est due à l'augmentation continue des gaz à effet de serre (Yéo, 2017).

La simulation des paramètres climatiques à l'horizon 2021-2050 du bassin a permis de prévoir à l'horizon les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé sous l'impact du changement climatique. L'analyse de ces projections montre qu'il se produira une baisse des débits d'étiage dans le bassin versant de la Marahoué à Bouaflé comme prévu dans le bassin versant de la Comoé (Yéo, 2017) qui entrainera une baisse des écoulements superficiels et souterrains à l'horizon 2050.

Conclusion partielle

Les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé varient d'une année à une autre. La variable utilisée pour les étiages est le QMNA. La loi retenue pour les étiages du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est la loi lognormale à deux paramètres. Les débits seuils de vigilance et de crise du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé est respectivement égal à 0,256 m³/s et 0,209 m³/s. La simulation des étiages à l'horizon 2021-2050 s'est effectuée au moyen du modèle GR2M. Cette simulation montre une baisse des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 comparée à la période de référence 1961-1994.

CONCLUSION

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de caractériser les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

Pour y parvenir, nous nous sommes fixés trois (3) objectifs spécifiques. Il était question de déterminer des débits-seuils, ensuite évaluer les étiages, enfin de simuler les débits d'étiage à l'horizon 2021-2050.

Pour l'analyse fréquentielle, la loi lognormal s'ajuste bien aux modules du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé avec la plus grande probabilité à posteriori 99,34 et les plus faibles valeurs de critères de BIC et AIC qui sont respectivement de 95,771 et 92,718. L'étude des quantiles d'étiage par la loi lognormale a permis de connaître les débits d'étiage pour les périodes de retour de 2 ans, de 5 ans, de 10 ans, de 20 ans et de 50 ans). La détermination des débits-seuils d'étiage a montré le débit limite du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé qui est de 0,256 m³/s.

L'évaluation des débits d'étiage a mis en évidence la nature des étiages. Lorsque les débits d'étiage sont : supérieurs à 0,20 m³/s on parle d'étiage sec, supérieur à 0,4 m³/s on parle d'étiage moyen, supérieur à 4 m³/s on parle d'étiage humide.

La simulation des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050 par le modèle GR2M sous les effets des changements climatiques a été évalué à l'aide des scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 prévoient une variation importante (étiages relativement faibles) des débits d'étiage respectivement de 0,03 m³/s à 3,55 m³/s et de 0,14 m³/s à 5,44 m³/s et une baisse des étiages par rapport à la période 1961-1994.

Les seuls résultats d'une analyse fréquentielle ne suffisent pas à déterminer les situations d'étiage. Celle-ci sont en effet dépendantes des activités anthropiques et des besoins humains qui semblent plus définir les niveaux de crise que la situation hydro-climatique elle-même.

A cet effet une perspective s'ouvre en vue d'éviter des problèmes liés à la disponibilité en eau dans le bassin. Il est donc important de mener une étude sur l'étiage qui prendra en compte les différents usages du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé.

REFERENCES

REFERENCES

- Abi-Zeid I. & Bobée B. (1999). La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique, *Revue des Sciences de l'Eau*, (n°12/3) : 459-483.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université Nationale (Abidjan, Côte d'Ivoire), 478 p.
- Brida A.B. (2005). Elaboration de l'atlas hydro-climatique de la Côte d'Ivoire : Etude statistique des écoulements de cours d'eau et bilan hydrique. Mémoire de DEA, UFR des sciences et gestion de l'environnement, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 117 p.
- De Marsily G. (2013). Les défis de l'eau. *Encyclopaedia Universalis*, p 12.
- Garcia F. (2016). Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris, France), 222 p.
- Girard G., Sircoulon J. & Touchebeuf P. (1970). Aperçu sur les régimes hydrologiques de côte d'ivoire. *Service Central hydrologique*, 91 p.
- Goula A.T.B., Kouassi J.V. & Savané I. (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*, 17(1) : 1-12.
- RGPH (2014). Recensement Général de l'Habitat et de la Population (RGPH), Répertoire des localités : Région de la Marahoué (Côte d'Ivoire), 47 p.
- Jourda J.P.R. (2002). Les ressources en eau souterraine de Côte d'Ivoire et le cas des aquifères transfrontaliers entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. *Proceedings of Managing shared aquifer resources in Africa UNESCO*, Paris, France, pp 87-92.
- Kabouya M. & Michel C. (1991). Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4(4) : 569-587.

REFERENCES

- Kouassi A M., Karim R A., N'guessan Bi T. M., KOUAME K F., BIEMI J. (2018). Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'Zi (côte d'ivoire). *Agronomie Africaine*, 30 (3) : 215 - 223 (2018).
- 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 d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 186 p.
- Lang C. (2007). Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 210 p.
- Lang C. (2011). Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*. URL: <https://journals.openedition.org/cybeo/24827>, 210 p.
- Makhlouf Z. & Michel C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for french watersheds. *Journal of Hydrology*, 162(3-4) : 299-318.
- Maréchal J.C., Robert W., Patrick L., Kambhampati S. & Frédéric T. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Compte Rendus Géosciences*, 335 : 451-460.
- Maréchal J.C., Dewandel B. & Subrahmanyam K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40(11) : 422-430.
- Meigh J., Tate E. & McCartney M. (2002). Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. *Friend 2002-Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice*, 274 : 181-188.
- Meylan P., Favre A.C. & Musy A. (2008). Hydrologie fréquentielle : une science prédictive, *Science et Ingénierie de l'Environnement*, EPFL Press, Lausanne, 174 p.

REFERENCES

- Mouelhi C. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts de Paris, France, 274 p.
- Mouelhi C., Michel C., Perrin C. & Andréassian V. (2006). Stepwise development of a two parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318 : 200- 214.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I : à discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 : 282-290.
- N'guessan Bi V.H., Saley M.B., Solange M., Yapi A.F., Kouadio B.H., Biémi j. & Kouadio A. (2017). Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans la région de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Engineering Science*, 40/10 : 2319 – 6726.
- Pachauri R.K. & Reisinger A. (2008). Bilan 2007 des changements climatiques. *In* : Rapport de synthèse, pp. 156-203.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p.
- Sawadogo A. N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta : étude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université de Grenoble, France, 350 p.
- Roger B. (1993). Reclus – la documentation française. Les mots de la géographie, Paris, 200 p.
- Soro G.E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR des sciences et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 172 p.
- Souanef N. (2015). Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod. Mémoire de Master en Hydraulique Urbaine, Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra (Algérie), 84 p.
- Tagini B. (1971). Thermal conductivity of compressed earth bricks strengthening by shea butter wastes with ceement. Thèse de Doctorat de l'Université de Lausanne, France, 302 p.

REFERENCES

- Tasker G.D. (1987). A comparison of methods for estimating low flow characteristics of streams. *Water Resources Bulletin*, 112(6) : 1077-1083.
- Thornthwaite C.W. (1950). An approach toward a rational classification of climate, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 27: 55-99.
- Vogel R.M. & Kroll C.N. (1989). Low flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients. *Journal of Water Resources Bulletin*, 26(2) : 754-786.
- Whitfield P.H., Wang J.Y. & Cannon A.J. (2003). Modelling Future Stream flow Extremes Floods and Low Flows in Georgia Basin, BritishColumbia. *Canadian Water Resources Association*, 28 : 663-656.
- Xu C. & Singh V.P. (2004). Review on regional water resources assessment model under stationary and changing climate. *Water Resources Management*, 16(6) : 591-612.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yéo W.E. (2017). Effects of climate change and human activities on water resources in the Comoe river basin (West Africa). Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou (Republic of Benin), Bénin, 118 p.

RESUME

Dans un contexte où les changements climatiques impactent les ressources en eau et les prélèvements en eau ne cessent d'augmenter, la connaissance des débits d'étiage s'avère nécessaire pour une exploitation rationnelle des ressources en eau. L'objectif de cette étude est de caractériser les débits d'étiage du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé dans pour une meilleure gestion des ressources en eau de ce bassin. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé les données de débits mensuels couvrant la période 1961-1994, les données de pluies et d'évapotranspiration de 1961 à 1994 et les données pluies et d'évapotranspiration simulées par le modèle climatique (RCA4) sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050. La méthodologie a consisté d'abord à calculer les débits seuils, ensuite évaluer les étiages et enfin simuler, à l'aide du modèle GR2M, les débits d'étiage du bassin verant de la Marahoué à Bouaflé. Les résultats des débits-seuils ont mis en évidence les débits limites du bassin versant de la Marahoué à Bouaflé. L'évaluation des étiages a permis de connaître la nature des étiages. La simulation des débits d'étiage a montré une baisse des débits d'étiage à l'horizon 2021-2050.

Mots clés : débit d'étiage ; changements climatiques ; seuil limite, bassin versant de la Marahoué à Bouaflé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire).

ABSTRACT

context where climate change has an impact on water resources and water withdrawals are constantly increasing, knowledge of low flow rates is necessary for the rational use of water resources. The objective of this study is to characterize the low flow rates of the Marahoué watershed in Bouaflé in order to improve the management of water resources in this basin. To achieve this objective, we used monthly flow data covering the period 1961-1994, rainfall and evapotranspiration data from 1961 to 1994 and rainfall and evapotranspiration data simulated by the climate model (RCA4) under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios over the period 2021-2050. The methodology consisted in calculating the threshold flows, then evaluating the low flows and finally simulating, using the GR2M model, the low flow flows of the Yerant basin of the Marahoué in Bouaflé, The results of the threshold flows highlighted the flows limits of the watershed of the Marahoué in Bouaflé. The evaluation of the low water levels made it possible to know the nature of the low water levels. The simulation of low flow has shown a decrease in low flow by 2021-2050.

Keywords : low flow rate ; climatic changes ; threshold limit, watershed of the Marahoué in Bouaflé (Center-West of Côte d'Ivoire).