



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 :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0357

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002899

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN
VERSANT DU HAUT-BANDAMA A BADIKAHA
(NORD DE LA COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

LEKPAI Doudou Onésime Eddy

JURY

Président : Mme. TRAORE Karidia, Professeur Titulaire,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : Mme. YAO Affoué Berthe Epse TOURE, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. MANGOVA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement
le : 27 février 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 :
2019-2020**

N° D'ORDRE : 0357

**N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002899**

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

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN
VERSANT DU HAUT-BANDAMA A BADIKAHA
(NORD DE LA COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

LEKPAI Doudou Onésime Eddy

JURY

Président : Mme. TRAORE Karidia, Professeur Titulaire,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : Mme. YAO Affoué Berthe Epse TOURE, Maître-Assistant,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

**Soutenu publiquement
le : 27 février 2021**

DEDICACES

A

Mon père **LEKPAI Digbeu Francis**, pour son soutien moral, matériel et financier durant tout mon cursus scolaire et universitaire.

Ma mère **ASSIATA Traore Epse LEKPAI** pour son soutien moral et surtout spirituel.

Mes petites sœurs **LEKPAI Priscile**, **LEKPAI Tryphine** et mon petit frère **LEKPAI Jason Yvan**.

A tous ceux qui ne cessent de me soutenir,

Je vous dédie ce mémoire !!!

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux dirigeants de l'Université Jean Lorougnon Guédé avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) pour le travail abattu dans le cadre de notre formation.

J'adresse mes sincères remerciements à Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement et par ailleurs Directeur scientifique de ce mémoire. Professeur, je vous dis grand merci pour la bonne gestion de l'UFR Environnement et pour votre détermination à garantir un encadrement de qualité aux étudiants de cette UFR.

Je réitère également ma gratitude aux responsables de la SUCAF-CI qui nous ont ouvert leur portes et permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions.

Mes vifs remerciements vont à l'endroit des membres du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'UJLoG, pour leur aimable accueil et leur disponibilité. Je remercie plus particulièrement Docteur DIBI Brou, Directeur dudit laboratoire pour avoir accepté de m'accueillir dans son laboratoire.

J'exprime ma reconnaissance au Docteur YAO Affoué Berthe Epse TOURE, pour ses conseils, ses critiques, ses remarques et son sens du travail qui m'ont permis de mener à bien ce travail jusqu'à la finition.

Mes remerciements vont également à l'endroit des personnes suivantes qui de par leurs conseils et soutien m'ont permis de mener à bien ce travail :

Docteur KOUADIO Zilé Alex, Responsable de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement, pour son encadrement dont j'ai bénéficié en Licence et qui nous a été très bénéfique pour la réalisation de ce travail;

Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Responsable du parcours « Master Génie de l'Eau et de l'Environnement » pour ses conseils et le suivi dont j'ai bénéficié depuis mon arrivée à l'UFR Environnement.

A la famille DOSSO, je vous suis infiniment reconnaissant pour votre soutien moral, matériel et financier durant tout mon second cycle. Puisse Dieu vous le rendre au centuple.

A ZAGBAHI Odette Espe AHOLIA, je lui suis très reconnaissant pour m'avoir ouvert ses bras depuis mon arrivée dans cette ville. Merci infiniment. Puisse Dieu te donner une longévité et une santé de fer.

Aux Doctorants OUEDE Blaise, KOFFI Bérénger, GOE Bi Antoine, trouvez ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour votre aide, vos conseils et vos remarques.

Je fais une mention spéciale de remerciements à N'GUESSAN Jean, YAO Anne Josiane, N'CHO Tchimou Bruce, N'GORAN Yao Patrick respectivement pour leur soutien financier, moral et matériel pour la réalisation de ce mémoire.

A ZOURE Moussa merci pour ta participation à la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont accueilli, conseillé et soutenu lors de la rédaction de ce mémoire.

À toutes ces personnes que nous n'avons pas pu citer ici, sachez que vous occupez aussi une place de choix dans notre cœur. Je vous réitère mes sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
SIGLES ET ABREVIATIONS	iv
LISTES DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ANNEXES	vii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
1.1. Description de la zone d'étude	3
1.1.1. Localisation de la zone d'étude.....	3
1.1.2. Géomorphologie	3
1.1.3. Précipitations et températures	4
1.1.4. Réseau hydrographique.....	5
1.1.5. Végétation	7
1.1.6. Géologie.....	7
1.1.7. Sols.....	7
1.1.8. Aspects socio-économiques	8
1.2. Généralités sur les changements climatiques	8
1.2.1. Définition des changements climatiques.....	8
1.2.2. Effet de serre	8
1.3. Description des modèles climatiques	9
1.3.1. Modèles climatiques globaux (MCG).....	9
1.3.2. Modèles climatiques régionaux (MCR).....	10
1.3.3. Description des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.....	11
1.4. Description, structure et fonctionnement de GR2M.....	11
1.5. Présentations des activités de la SUCAF CI.....	13
1.5.1. Historique.....	13

1.5.2. Description des activités de la SUCAF-CI	13
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	14
2.1. MATERIEL	14
2.1.1. Données.....	14
2.1.1.1. Données climatiques	14
2.1.1.2. Données hydrométriques.....	15
2.1.1.3. Données topographiques	15
2.1.2. Outils.....	15
2.2. METHODES	16
2.2.1. Caractérisation des changements climatiques du bassin versant du Haut Bandama	16
2.2.1.1. Evaluation de la fiabilité du modèle climatique régional RCA4	16
2.2.1.2. Détermination des amplitudes et taux de variation des paramètres	17
2.2.2. Simulation des débits du fleuve Bandama à Badikaha aux horizons 2050 et 2100.	17
2.2.2.1. Préparation des données d'entrée et de sorties du modèle GR2M.....	18
2.2.2.2. Calage et validation du modèle	18
2.2.2.3. Construction de séries climatiques réalistes aux horizons 2050 et 2100	19
2.2.3. Estimation de la disponibilité en eau du Haut Bandama à Badikaha aux horizons 2050 et 2100.....	20
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	22
3.1. RESULTATS.....	22
3.1.1. Caractérisation des changements climatiques du bassin du haut Bandama aux horizons 2050 et 2100.....	22
3.1.1.1. Evaluation de la fiabilité des sorties du modèle climatique RCA4.....	22
3.1.1.2 Analyse de l'évolution des paramètres climatiques aux horizons 2050 et 2100	26
3.1.2 Simulation des écoulements aux horizons 2050 et 2100	32
3.1.2.1. Calage et validation du modèle	32
3.1.2.2. Evolution des débits moyens mensuels aux horizons 2050 et 2100	33

3.1.3. Analyse de la disponibilité en eau du bassin aux horizons 2050 et 2100	34
3.1.3.1. Evolution de la recharge aux horizons 2050 et 2100	34
3.1.3.2. Analyse des paramètres du bilan hydrologique.....	35
3.2. DISCUSSION	37
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	40
REFERENCES	42

SIGLES ET ABREVIATIONS

AEP	: Alimentation en Eau Potable
AFD	: Agence Française de Développement
CCC CI/UE	: Cellule de Coordination de la Coopération Côte d'Ivoire Union Européenne
CLIMSUCAF	: Services Climatiques et Météorologies pour la production et l'exploitation durable de la Canne à sucre en Afrique
CMD	: Coefficient Mensuel de Débits
DGA	: Directeur Général Adjoint
DI	: Direction Irrigation
DP	: Directions des Plantations
DRD	: Direction Recherche et Développement
DTA	: Direction Technique Agricole
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
PESUF	: Projet Extension au Sud de Ferké 2
RCP	: Representative Concentration Pathway
SODESUCRE	: Société pour le Développement des plantations de canne à Sucre, l'industrialisation et la commercialisation du Sucre
SOMDIAA	: Société d'Organisation de Management et de Développement des Industries
SUCAF-CI	: Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire
UE-RCI	: Union Européenne-République de Côte d'Ivoire
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé

LISTES DES TABLEAUX

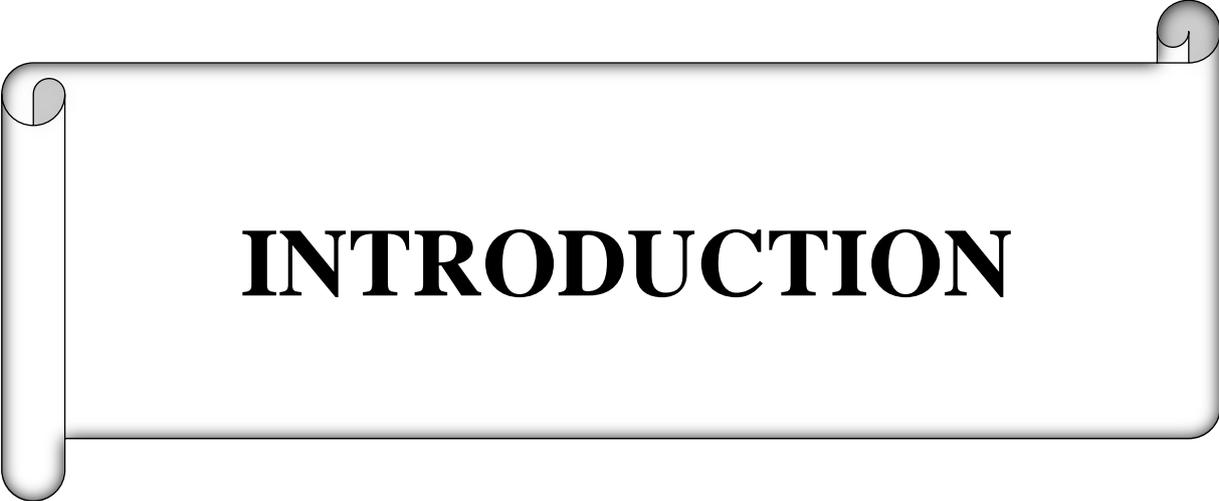
Tableau I	: Humidités caractéristiques moyennes des sols du site de Ferké	8
Tableau II	: Caractéristiques des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5	11
Tableau III	: Information sur le modèle climatique régional	15
Tableau IV	: Evaluation des erreurs de précipitations simulées et observées à Ferké et Korhogo sur la période 1986-2005 selon RCP 4.5 et RCP 8.5	23
Tableau V	: Evaluation des erreurs de températures simulées et observées sur la période 1986-2005 à Ferké.....	25
Tableau VI	: Evaluation des erreurs de températures simulées et observées sur la période 1986-2005 à Korhogo.....	25
Tableau VII	: Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à Ferké selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5.....	27
Tableau VIII	: Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à Korhogo selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5.....	28
Tableau IX	: Evolution de la température aux horizons 2050 et 2100 à Ferké selon les scénarios RCP4.5 et 8.5.....	30
Tableau X	: Evolution de la température aux horizons 2050 et 2100 à Korhogo selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5.....	31
Tableau XI	: Résultats des calages et validations du modèle hydrologique GR2M.....	32
Tableau XII	: Récapitulatif de l'évolution des paramètres du bilan hydrologique actuels (1986-2005) et futurs (2031-2050 et 2081-2100) sur le bassin versant du Haut Bandama.	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Localisation du bassin versant du Haut Bandama	3
Figure 2	: Diagramme ombrothermique de la station de Ferké 2 sur la période 1999-2019 ..	5
Figure 3	: Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Haut Bandama.....	6
Figure 4	: Évolution des débits moyens mensuels du Haut Bandama à la station route Korhogo-Badikaha sur la période 1975-1996.	6
Figure 5	: carte géologique du bassin versant du Haut Bandama	7
Figure 7	: Illustration schématique de la structure des modèles climatiques globaux.	10
Figure 8	: Représentation schématique du fonctionnement des modèles climatiques régionaux.....	10
Figure 9	: Schéma conceptuel du modèle GR2M	12
Figure 10	: Localisation des postes pluviométriques et stations synoptiques de la zone d'étude.....	14
Figure 11	: Comparaison des précipitations moyennes mensuelles observées et simulées : .	22
Figure 12	: Comparaison des températures simulées et observées: A) Ferké ; B) Korhogo .	24
Figure 13	: Gamme de variation moyenne des températures moyennes mensuelles aux horizons 2050 et 2100 à Ferké et Korhogo	29
Figure 14	: Calage et validation de GR2M à la station route Korhogo-Badikaha : A) Calage, B) validation	32
Figure 15	: Evolution des débits moyens mensuels des périodes 1986-2005 (référence), 2031-2050 et 2081-2100 de la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha.....	34
Figure 16	: Evolution des infiltrations sur le bassin versant du Haut Bandama	35
Figure 17	: Evolution des paramètres du bilan hydrologique dans le bassin versant du Haut Bandama.....	36

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1** : Evolution de la pluviométrie à Boundiali aux horizons 2050 et 2100 selon les scenarios RCP4.5 et 8.5.....a
- Annexe 2** : Evolution de la pluviométrie à M'bengué aux horizons 2050 et 2100 selon les scenarios RCP4.5 et 8.5.....b
- Annexe 3** : Evolution de la pluviométrie à Ouangolo aux horizons 2050 et 2100 selon les scenarios RCP4.5 et 8.5.....c



INTRODUCTION

Introduction

Les ressources en eau constituent l'une des ressources naturelles les plus importantes pour la survie de l'humanité et le développement socio-économique des nations (FAO/ROA, 2001; Odada, 2006). En Afrique de l'Ouest, les perturbations climatiques caractérisées par de longues sécheresses se sont accentuées depuis le début des années 1970. La question des changements climatiques liée au réchauffement global de la planète soulève de nombreuses interrogations quant au devenir des ressources en eau. En effet, les changements climatiques ont pour effets, la réduction de la production agricole, la détérioration de la sécurité alimentaire, l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau (GIEC, 2007). Ces changements climatiques menacent donc directement la vie humaine dans le monde entier et particulièrement en Côte d'Ivoire où l'eau est un élément déterminant pour de multiples activités économiques telles que l'agriculture, la production d'électricité ou encore l'alimentation en eau potable. C'est le cas de la Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire (SUCAF-CI), une entreprise agro-industrielle située dans les villes de Ferkessédougou et de Tafiré, au Nord de la Côte d'Ivoire.

La Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire exploite les eaux du fleuve Bandama pour la pratique de l'irrigation de la canne à sucre, la fabrication du sucre de canne et les besoins domestiques.

A l'instar des grandes industries agroalimentaires ivoiriennes, les besoins en eau pour l'irrigation et des populations de la région augmentent progressivement et les ressources en eau sont de plus en plus sollicitées. Or, les études sur la variabilité climatique effectuées dans la zone ont montré une baisse généralisée des précipitations (Kouassi *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2013 ; Fossou *et al.*, 2015 ; Adiaffi *et al.*, 2016). Ces anomalies pluviométriques observées sur plusieurs années consécutives se sont répercutées sur les écoulements des cours d'eau provoquant une baisse considérable de leurs caractéristiques hydrologiques (Soro *et al.*, 2017). Ainsi, cette baisse des précipitations a entraîné celle des écoulements (Kouassi *et al.*, 2018). Ces déficits pluviométriques ont également occasionné la diminution du volume en eau de certaines retenues dans la zone (Soro, 2020). Par ailleurs, les scénarios d'évolution du climat indiquent que la variabilité climatique va s'amplifier et s'intensifier au cours des décennies à venir (Kouakou, 2011 ; Gauze *et al.*, 2018). Dès lors, prévoir la réponse hydrologique d'un bassin versant devient une priorité dans la gestion des ressources en eau. C'est dans ce contexte qu'un projet pilote financé par l'Agence Française de Développement (AFD) en vue d'étudier l'influence des paramètres climatiques (pluie, humidité, vent, ensoleillement, températures) sur les processus de croissance de la canne à sucre est en cours d'exécution. Ce projet a pour but

Introduction

d'étudier la pertinence de la mise en place de systèmes d'informations climatiques pour le secteur de la canne à sucre en république de Côte d'Ivoire avec l'exemple de la SUCAF-CI.

C'est dans cette perspective que cette étude intitulée : « **Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Badikaha (Nord de la Côte d'Ivoire)** » est initiée. L'objectif principal de cette étude est d'analyser les impacts des changements climatiques sur la réponse hydrologique du bassin versant du Haut Bandama en vue d'optimiser la production du sucre dans les complexes sucriers de Ferké.

Plus spécifiquement il s'agira de :

- ✓ caractériser les changements climatiques du bassin versant du Haut Bandama aux horizons 2050 et 2100 ;
- ✓ simuler les débits du fleuve Bandama à Badikaha aux horizons 2050 et 2100 ;
- ✓ estimer la disponibilité en eau du fleuve Bandama aux horizons 2050 et 2100.

Le présent mémoire est structuré en trois grandes parties comme suit :

- la première partie présente les généralités sur la zone d'étude et traite du contexte de l'étude ;
- la deuxième partie expose le matériel et les méthodes utilisés pour mener cette étude ;
- la troisième partie présente les résultats et leur discussion.

Ce mémoire s'achève par une conclusion comportant des perspectives de l'étude.



PREMIERE PARTIE :

GENERALITES

1.1. Description de la zone d'étude

1.1.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude est un sous-bassin du fleuve Bandama dénommé bassin versant du Haut Bandama avec pour exutoire la station hydrométrique de la route Korhogo-Badikaha. Le bassin versant du Haut Bandama est situé entre les longitudes 5°20' et 6°0'Ouest et les latitudes 9°20' et 10°0' Nord (Figure 1). Il s'étend sur les degrés carrés des régions du Poro, du Tchologo et une partie de la Bagoué avec une superficie estimée à 9 850 km² et représente environ 10% du bassin versant entier du fleuve Bandama.

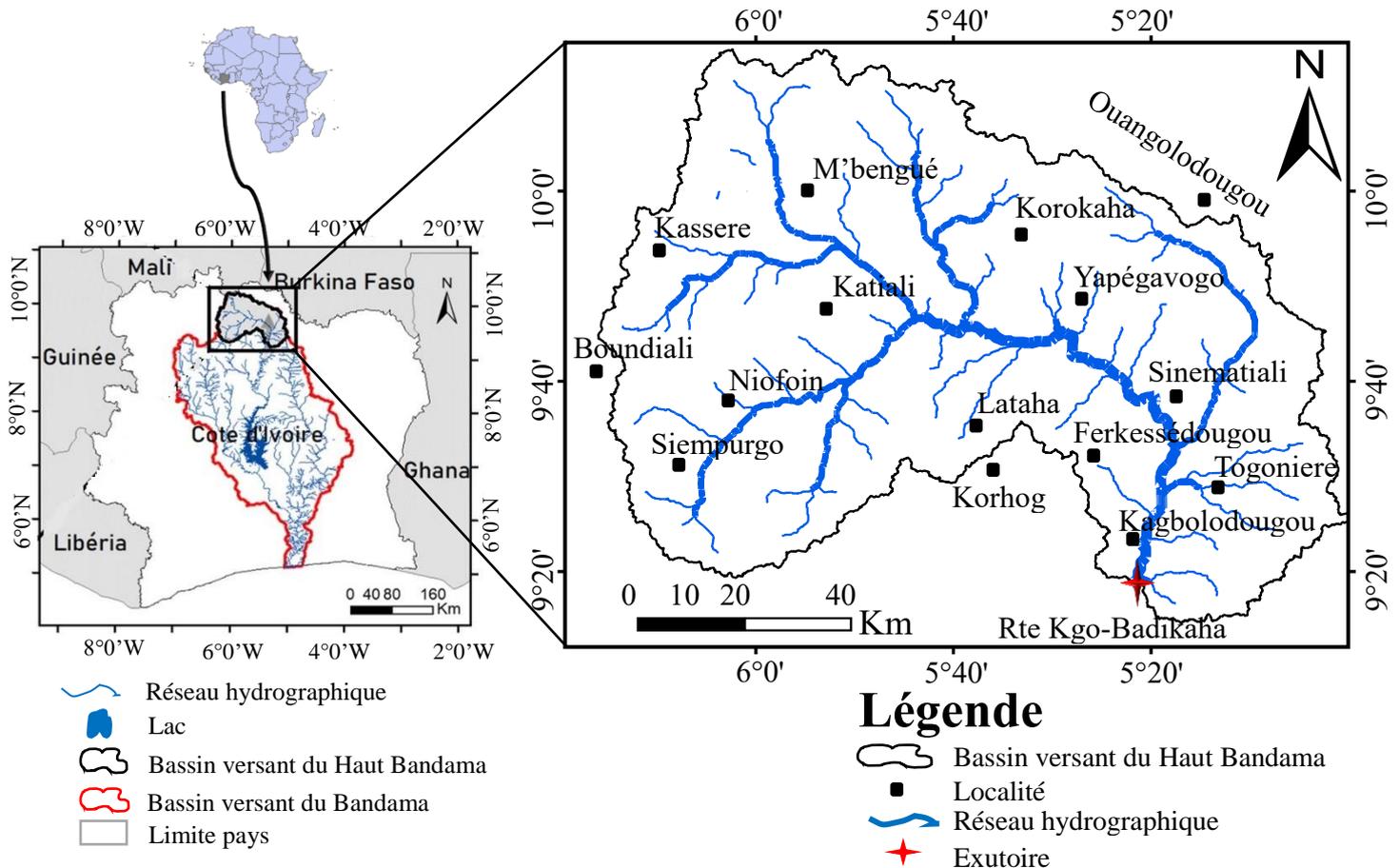


Figure 1: Localisation du bassin versant du Haut Bandama

1.1.2. Géomorphologie

Le bassin versant étudié appartient à un grand ensemble de relief qui évolue de façon monotone. Toutefois, deux niveaux se distinguent : un premier niveau d'altitude compris entre 172 et 300 m qui correspond à une vaste plaine et un deuxième niveau d'altitude (Figure 2), supérieure à 300 m qui est constitué de plateaux (Biémi, 1992). Les vastes plateaux étagés à la surface plane (horizontale ou subhorizontale) sont les plus développés dans la zone. Ils représentent plus de 75 % de la superficie totale du bassin. Cette particularité favorise la

formation des étangs, l'infiltration des eaux et donc la recharge éventuelle des nappes (Biémi, 1992).

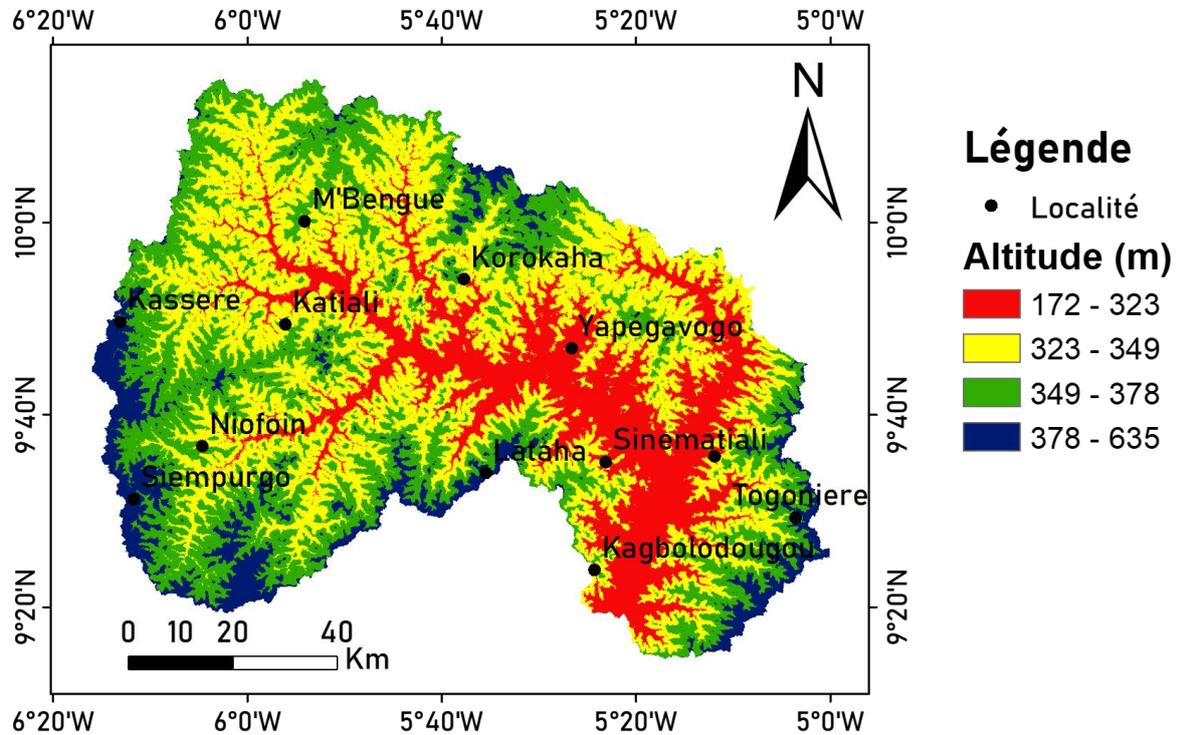


Figure 2: Carte du relief du bassin versant du Haut Bandama

1.1.3. Précipitations et températures

Le bassin versant du Haut Bandama est sous l'influence du régime tropical de transition (Kouassi *et al.*, 2018). La température moyenne interannuelle est de 27°C et ce régime pluviométrique se caractérise par deux grandes saisons (Figure 3) :

- ❖ une saison des pluies d'avril à octobre, avec des précipitations moyennes mensuelles variant de 93 à 243 mm sur la période 1999-2019 ;
- ❖ une saison sèche de novembre à mars avec des pluies moyennes variant entre 1,5 et 47 mm sur la période 1999-2019.

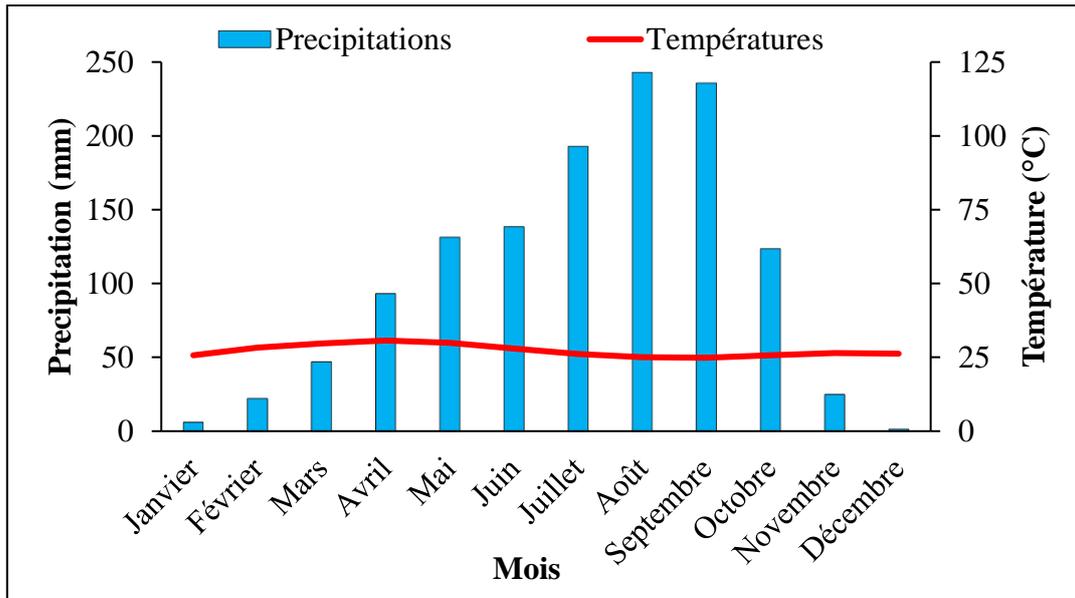


Figure 3: Diagramme ombrothermique de la station de Ferké 2 sur la période 1999-2019

1.1.4. Réseau hydrographique

Le bassin versant du Haut Bandama prend sa source dans le Nord de la Côte d'Ivoire, entre les localités de Korhogo et Boundiali, à une altitude de 480 m. Il s'écoule d'abord d'Ouest en Est sur près de 200 km, en décrivant un arc de cercle autour de Korhogo (Figure 4), puis prend une direction Nord-Sud où son cours présente de nombreux méandres. Dans la partie amont, le bassin est largement drainé par le Bandama et ses principaux affluents (Solomougou, Lokpoho, Badénou) (Tate & Lyle, 1975 ; Avenard, 1992). Le réseau hydrographique a une tendance curviligne et parfois rectangulaire. La forme du réseau la plus répandue dans la zone est de type dendritique (Jourda, 2005). La figure 4 montre le réseau hydrographique du bassin versant du Haut Bandama classifié selon la méthode de Strahler.

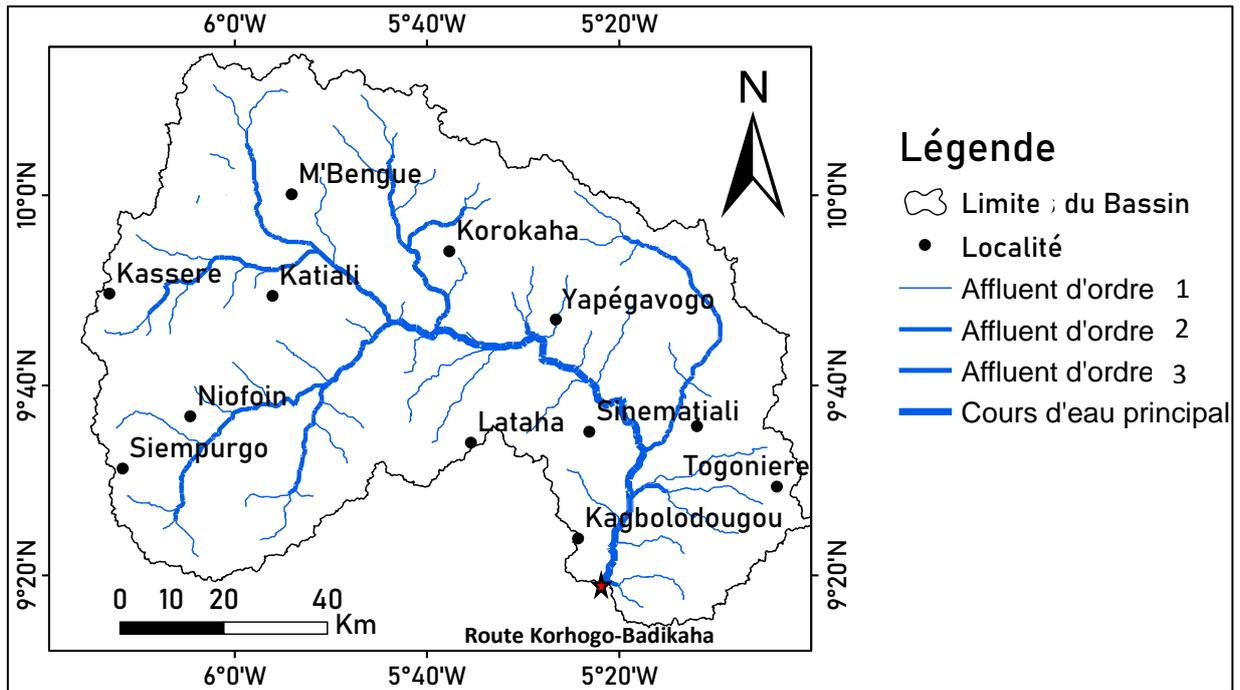


Figure 4: Carte du réseau hydrographique du bassin versant du Haut Bandama

Le régime hydrologique est calqué sur celui des précipitations. La variation des coefficients mensuels de débits (CMD) montre une période de hautes eaux d'août à octobre et une période de basses eaux de novembre à juillet. L'étiage total est observé en février-mars alors que le maximum des crues s'observe en septembre (Soro, 2020). La crue la plus importante est enregistrée en septembre avec un débit moyen de $122 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 5).

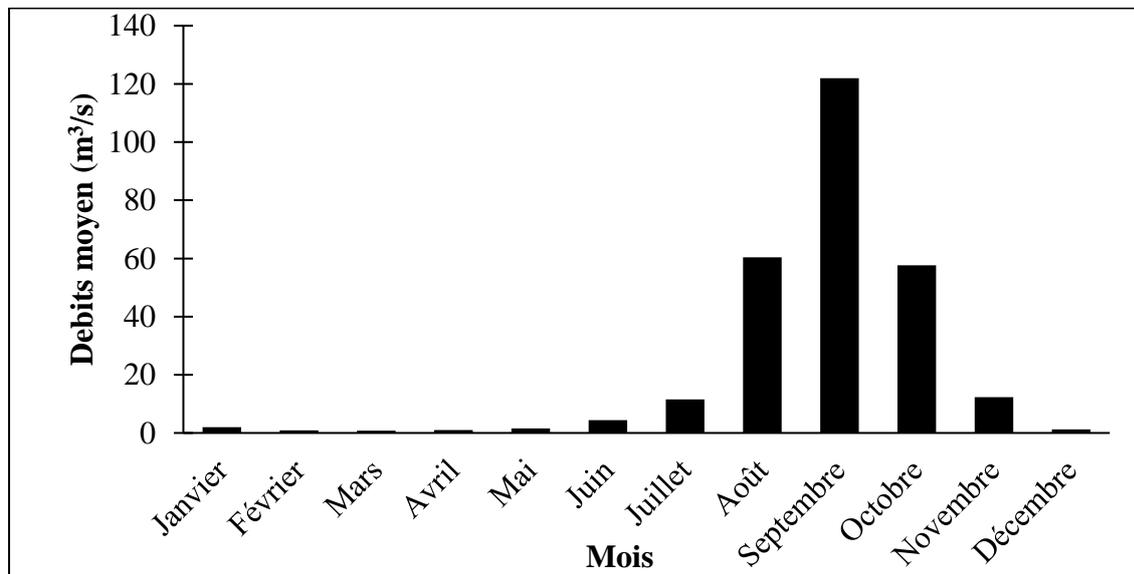


Figure 5: Évolution des débits moyens mensuels du Haut Bandama à la station route Korhogo-Badikaha sur la période 1975-1996.

1.1.5. Végétation

En liaison avec les régimes climatiques de la Côte d'Ivoire, cette partie du bassin du Bandama est dominée par une végétation de type soudanais. Il comprend les forêts claires et les savanes. Selon le peuplement forestier, la savane évolue vers un type boisé, arboré, arbustif ou herbeux (Soro *et al.*, 2013).

1.1.6. Géologie

Au plan géologique, la faible intensité du métamorphisme permet de distinguer deux grands groupes de formations (Arnould, 1961) : les formations d'origine sédimentaire et celles d'origine volcanique. On y distingue également des formations d'origine éruptive et des roches métamorphiques d'origine sédimentaire comprenant essentiellement des schistes variés et des micaschistes associés à des grauwackes pour former un flysch. Les roches d'origine volcanique sont représentées par des feutrages d'amphibole, d'albite, de chlorite et d'épidote, auxquelles s'ajoutent quelques roches basiques grenues (Figure 6).

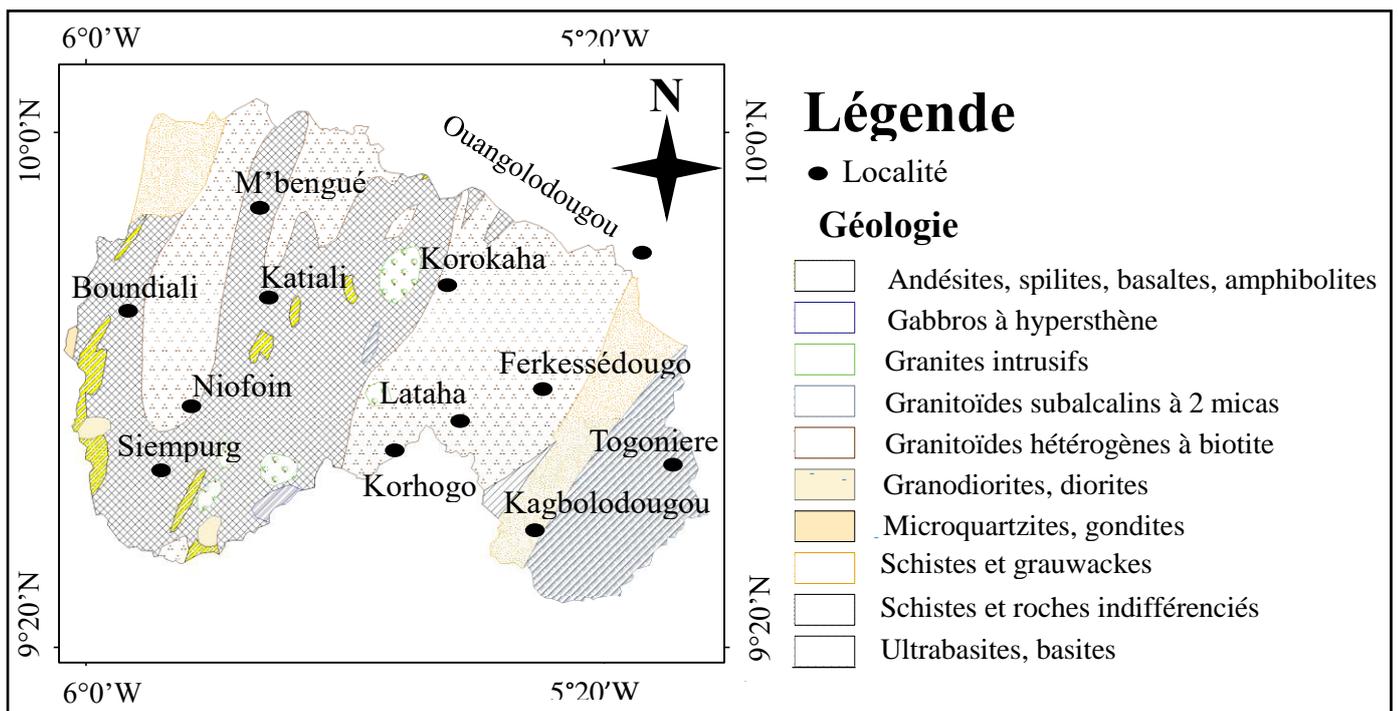


Figure 6: Carte géologique du bassin versant du Haut Bandama

1.1.7. Sols

Les sols dans les deux complexes sont des ferralsols avec des propriétés latéritiques et hydromorphes. Ces sols sont pauvres en argile et en matière organique (Kouamé, 2019). Ils sont de type limono-argileux, sablo-argileux et sableux (Tableau I). Ils ont donc une structure pauvre, fragile et prédisposée au compactage (Jean-Baptiste, 2015).

Tableau I: Humidités caractéristiques moyennes des sols du site de Ferké (Jean-Baptiste, 2015)

Type de sols	Humidité à la capacité au champ	Humidité au point de flétrissement temporaire
	θ_{cc} (%)	θ_{ft} (%)
limono-argileux	22	14
Sablo-argileux	17	9
Sable	13	7

1.1.8. Aspects socio-économiques

En 2014, le bassin versant comptait près de 1 510 533 habitants (INS, 2014). Les populations rurales du bassin versant pratiquent essentiellement l'agriculture et/ou l'élevage. Les spéculations cultivées sont :

- ✓ les cultures vivrières (igname, maïs, riz, arachide, mil, sorgho, patate douce, niébé, fonio);
- ✓ les cultures pérennes de rente (mangues, avocats, agrumes, anacarde);

1.2. Généralités sur les changements climatiques

1.2.1. Définition des changements climatiques

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) définit un changement climatique comme « tout changement du climat dû à sa variabilité naturelle ou résultant de l'activité humaine ». La Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) restreint cette définition en parlant de « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée sur une échelle de temps comparable ». Pour le GIEC (2007), le changement climatique se réfère à un changement statistiquement significatif dans l'état moyen du climat ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste sur une longue période de temps (décennies ou plus). Ce changement climatique peut être dû aux processus naturels internes ou à des forçages exogènes ou à des activités anthropiques persistantes dans l'atmosphère ou dans les usages du sol.

1.2.2. Effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux de l'atmosphère qui ont une origine naturelle ou anthropique (humaine) et qui, de par leur nature, interagissent avec le rayonnement

infrarouge terrestre (GIEC, 2007). Selon le GIEC (2013), ces gaz s'accumulent au niveau de l'atmosphère et participent à la conservation de la chaleur de la planète en absorbant le rayonnement émis par celle-ci et en le réémettant dans toutes les directions. Le rayonnement atmosphérique dû à l'effet de serre s'ajoute ainsi au rayonnement solaire direct pour réchauffer la surface terrestre. Il existe plusieurs types de GES, mais les plus répandus sont la vapeur d'eau (H_2O), les hydrocarbures légers comme le méthane (CH_4) et les gaz tels que le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde nitreux (N_2O), l'ozone (O_3), les fluorocarbures comme l'hydrofluorocarbure (HFC) et d'autres gaz inertes tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6) (GIEC, 2007).

1.3. Description des modèles climatiques

1.3.1. Modèles climatiques globaux (MCG)

Les modèles climatiques globaux sont une représentation mathématique simplifiée du système climatique fondée 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 1970 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 (Figure 7). Les colonnes sont elles-mêmes subdivisées en plusieurs couches (Viner et Hulme, 1997, cités par Kouakou (2011)). 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).

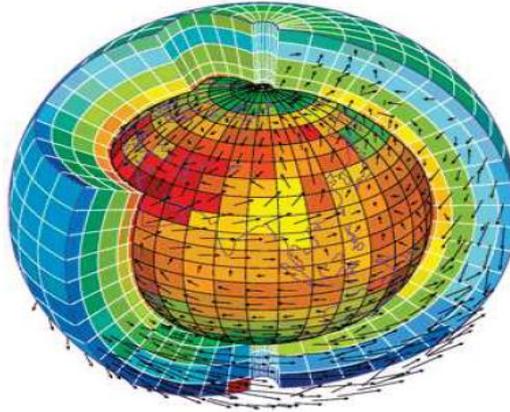


Figure 7: Illustration schématique de la structure des modèles climatiques globaux.

Source : <http://web.lmd.jussieu.fr> (Consulté le 10 janvier 2021)

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 (Figure 8). 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 (Viner et Hume, 1997 *in* Kouakou, 2011). Selon ces auteurs, 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). Le modèle climatique régional RCA4 a été utilisé pour la réalisation de cette étude.

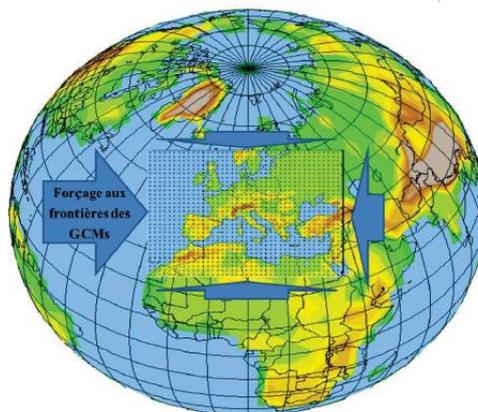


Figure 8: Représentation schématique du fonctionnement des modèles climatiques régionaux

Source : <http://web.lmd.jussieu.fr> (Consulté le 10 janvier 2021)

1.3.3. Description des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

Le scénario RCP 4.5 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 RCP 8.5, cependant, 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 RCP 8.5 devrait être considéré comme un scénario pessimiste, alors que le RCP 4.5 constituerait un scénario intermédiaire rendant compte des efforts déployés pour atténuer les changements climatiques (Yéo, 2017).

Les caractéristiques des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sont détaillées dans le tableau II.

Tableau II: Caractéristiques des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (GIEC, 2014)

Composant du scénario	RCP 4.5	RCP 8.5
Emission de gaz à effet de serre	Très bas	Très élevé
	Atténuation : faible à moyen	
Surface agricole	Très faible	Moyen
Pollution de l'air	Moyen	Moyen à élevé

1.4. Description, structure et fonctionnement de GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuels) 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 (Lavabre *et al.*, 1993 ; Makhoulouf et Michel, 1994 *in* Yao, 2015). Il a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya & Michel (1991), Makhoulouf & Michel (1994) *in* Yao (2015), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006), qui ont permis d'améliorer progressivement sa performance. La structure du modèle, bien qu'empirique, l'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 9. Le mode de fonctionnement général est le suivant :

- Une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct ;

Généralités

- 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 ;
 - 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.
- L'utilisation du modèle GR2M a donné des résultats satisfaisants pour la calibration et la validation du modèle dans le bassin versant du Haut Bandama (Yao, 2015).

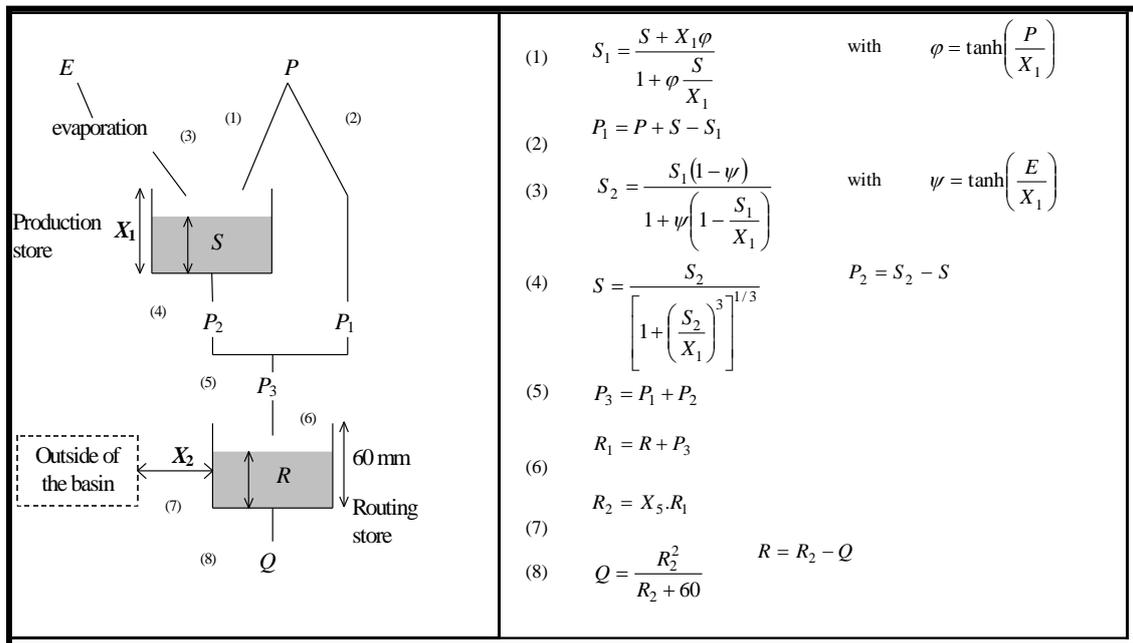


Figure 9: Schéma conceptuel du modèle GR2M (Mouelhi, 2006)

1.5. Présentations des activités de la SUCAF CI

1.5.1. Historique

La SUCAF-CI est née en 1997 suite à la privatisation de la SODESUCRE. C'est une société agro-industrielle, filiale du groupe SOMDIAA (Société d'Organisation de Management et de Développement des Industries Alimentaire et Agricole) qui a pour mission la production et la commercialisation du sucre de canne. La SUCAF-CI possède deux complexes sucriers (Ferké 1 et 2) d'une superficie totale de 45 000 ha, distants de 40 km l'une de l'autre

Ces complexes ont été construits dans les années 1970 dont l'une par une entreprise américaine (Ferké 1) et l'autre par une entreprise canadienne (Ferké 2). Sous l'autorité du Directeur Général Adjoint, elle comprend pour les deux sites, six (6) directions dont la direction des techniques agricoles (DTA) qui est composée des sous-directions suivantes :

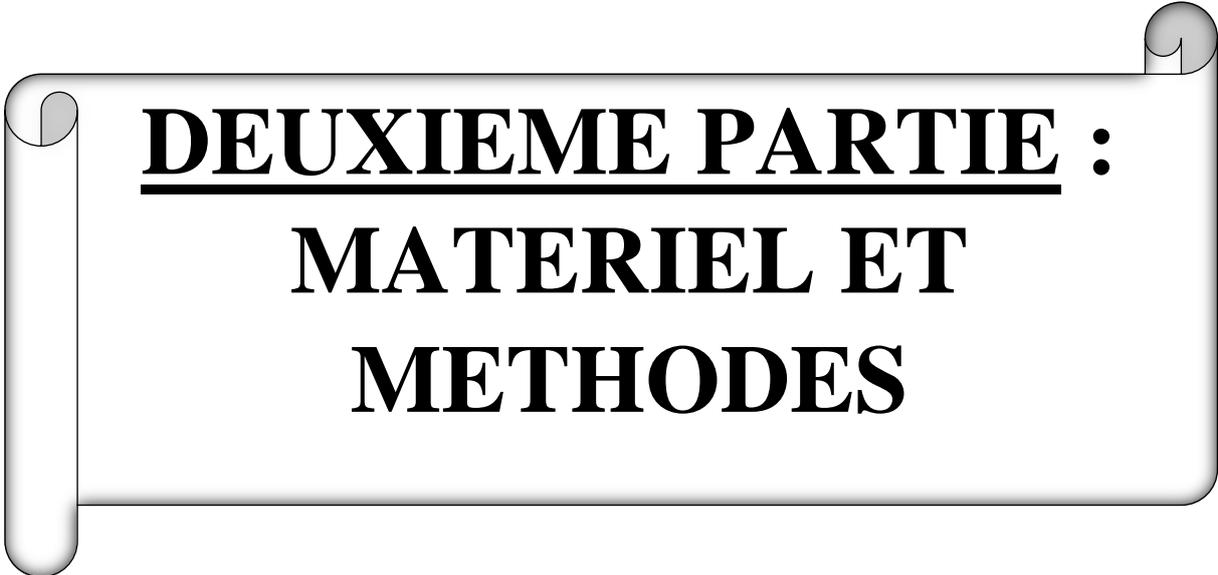
- la Directions des Plantations (DP) ;
- la Direction Recherche et Développement (DRD) ;
- la Direction Irrigation (DI) ;

1.5.2. Description des activités de la SUCAF-CI

La SUCAF-CI est implantée sur une superficie totale de 45 000 ha dont 12 400 ha sous cannes. Elle tire ses cannes de ses surfaces irriguées mais aussi des cultures villageoises environnantes. Au sein de chaque complexe sucrier, est installée une usine de transformation de la canne à sucre. Celle de Ferké 1 est spécialisée dans la production de sucre blanc tandis que celle de Ferké 2 est spécialisée dans la production du sucre roux. Ces produits sont commercialisés sous la marque « Princesse Tatie ».

Sur l'ensemble des parcelles de la SUCAF-CI, il existe divers type d'irrigation notamment : des pivots, des rampes frontales, du Goutte à goutte, des enrouleurs, la couverture classique et intégrale, etc.

Après les généralités qui nous ont permis d'avoir une notion sur le milieu physique et de situer le contexte de l'étude, nous passons à présent à la deuxième partie consacrée au matériel et méthodes adoptées.



DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET
METHODES

2.1. MATERIEL

2.1.1. Données

2.1.1.1. Données climatiques

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types de données climatiques : les données climatiques observées sur le terrain (aux différents postes pluviométrique et station synoptique) et les données climatiques simulées par le modèle climatique régional RCA4.

❖ Données climatiques observées

Les données climatiques observées (pluie et température) utilisées dans cette étude proviennent des stations de Ferké, Korhogo, Boundiali, M'bengué et Ouangolo sur la période 1970-2019 à l'échelle mensuelle et journalière (Figure 10). Ces données ont été fournies par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM).

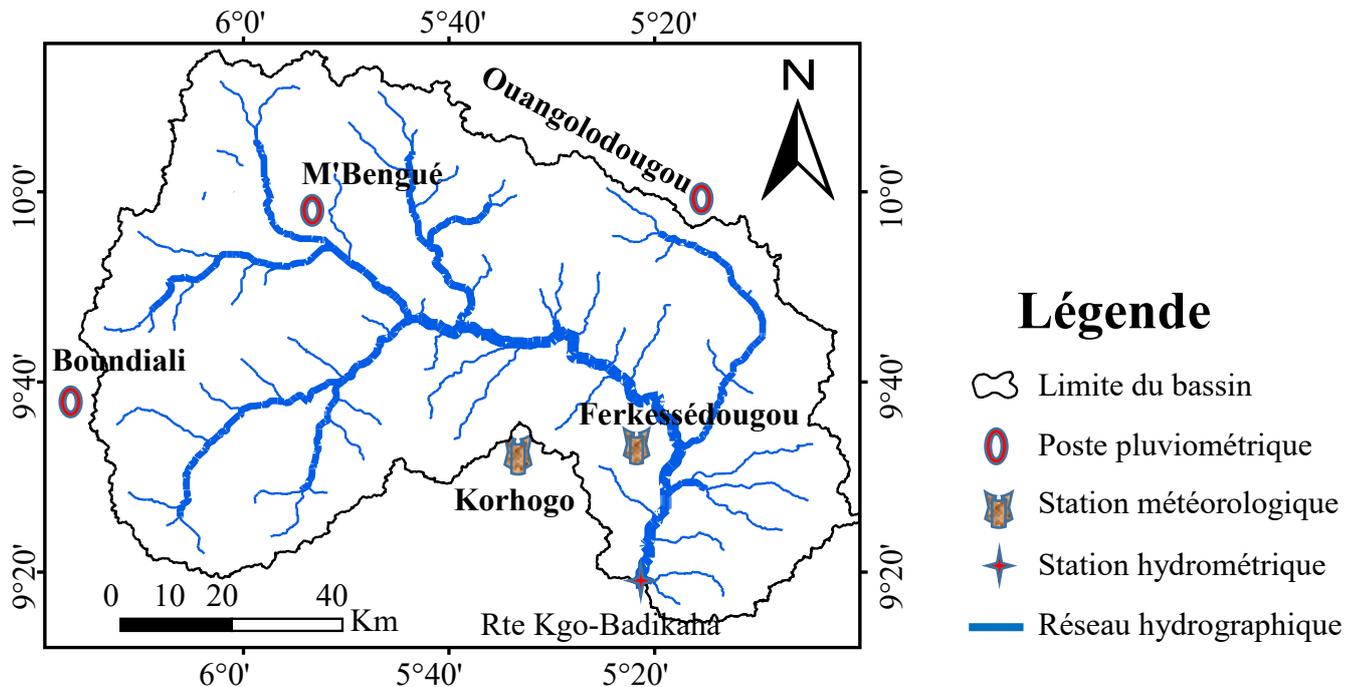


Figure 10: Localisation des postes pluviométriques et stations synoptiques de la zone d'étude

❖ Données climatiques simulées par le modèle RCA4

Les sorties du modèle climatique régionale RCA4 (pluie et température) ont été simulées selon les scénarios d'émission de gaz (RCP 2.6 ; RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5). Dans le cadre de cette étude le modèle climatique régional MCR a été utilisé suivant les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la période 1951-2100 aux stations de Ferké, Korhogo, Boundiali, M'bengué et Ouangolo.

Matériel et méthodes

Le modèle RCA4 de résolution 0,44° X 0,44° (soit 49km x49km) utilisé pour les sorties des données de climat futur provient du “Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)”. Il 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 ; Coulibaly *et al.*, 2018).

Le tableau III ci-dessous donne les informations relatives au modèle global et son modèle régionalisé associé.

Tableau III: Information sur le modèle climatique régional

Institut	MCR	Résolution	Modèle Global	Source
SMHI	RCA4	~50km (0,44° * 0,44°)	CNRM-CM5	Swedish Meteorological and Hydrological Institute - Rossby Centre Atmospheric model 4

2.1.1.2. Données hydrométriques

Les données de débits du fleuve Bandama enregistrés à la station hydrométrique de Korhogo-Badikaha (exutoire du bassin versant considéré) ont été fournies par la Direction de l’Hydrologie sur la période 1975-1996 au pas de temps journalier.

2.1.1.3. Données topographiques

Le modèle numérique d’altitude (MNA) utilisé à une résolution de 90 m. Il a permis d’extraire le bassin versant avec la station route Korhogo-Badikaha comme exutoire. Il est disponible sur le site internet : <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

2.1.2. Outils

Les outils de traitement des données constituent l’ensemble des outils qui nous ont permis d’atteindre nos différents objectifs.

Ce sont :

- ✓ Excel, utilisé pour la conversion des sorties du modèle climatique RCA4;le logiciel ArcGis 10.4.1 pour la réalisation des cartes de la zone d’étude ;
- ✓ le logiciel Hydraccess pour le calcul de la pluie moyenne sur le bassin versant ;

- ✓ le logiciel RStudio, utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Thornthwaite.
- ✓ le modèle hydrologique (GR2M) pour la modélisation pluie-débit.

2.2. METHODES

2.2.1. Caractérisation des changements climatiques du bassin versant du Haut Bandama

2.2.1.1. Evaluation de la fiabilité du modèle climatique régional RCA4

➤ Comparaison graphique des paramètres observés et simulés

La première question intéressante concernant la fiabilité du modèle est de savoir si le climat présent peut être simulé avec une occurrence suffisante par le modèle RCA4, car la confiance dans la performance d'un modèle pour la production de scénarii climatiques futurs est élevée s'il est capable de reproduire correctement le climat présent.

A l'aide de représentations graphiques telles que les nuages de points, les graphiques de comparaison entre les paramètres observés et simulés atteste de la performance du modèle à simuler les paramètres du climat futurs. C'est donc à l'issue de ce test de vérification de la fiabilité du modèle que les simulations des écoulements sont effectuées.

➤ Calcul de l'erreur relative entre les paramètres observés et simulés

L'écart entre les données observées et simulées sur la période 1986-2005 constitue l'erreur commise par le modèle.

Le calcul de l'erreur relative a été retenu comme critère numérique pour évaluer la performance du modèle RCA4. L'erreur relative (Er) permet de savoir si le modèle climatique surestime ou sous-estime les paramètres simulés et sont calculés (l'équation 1).

$$Er = \left(100 \times \frac{(X_{cal} - X_{obs})}{X_{obs}} \right) \quad (\text{Kouakou, 2011}) \quad (\text{Éq.1})$$

avec :

X_{cal} : valeur du paramètre calculé par le modèle ;

X_{obs} : valeur du paramètre observé.

- Si $Er > 0$ le modèle surestime le paramètre calculé ;
- Si $Er < 0$ le modèle sous-estime le paramètre calculé ;
- Si $Er = 0$ le modèle estime le paramètre calculé.

2.2.1.2. Détermination des amplitudes et taux de variation des paramètres

Nous comparons les données mensuelles de pluie et température simulées jusqu'à l'horizon 2100 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 aux valeurs observées sur la période de référence (1986-2005). Les deux périodes futures sont 2031-2050 et 2081-2100.

Les amplitudes de variation des températures exprimées en °C et de celles des précipitations en mm d'eau tombée sont calculées par l'équation 2 (Kouakou, 2011).

$$\Phi_i^{\text{hor}} = x_i^{\text{hor}} - x_i^{\text{ref}} \quad (\text{Éq.2})$$

avec :

x_i^{hor} : valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur la période considérée ;

x_i^{ref} : valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur la période de référence ;

i : l'horizon ;

Φ_i^{hor} : croissance ou décroissance relative des températures annuelles futures du bassin.

Les taux de variation sont exprimés en pourcentage et donnés par l'équation 3 :

$$\Phi_i^{\text{hor}} = 100 \times \frac{x_i^{\text{hor}} - x_i^{\text{ref}}}{x_i^{\text{ref}}} \quad (\text{Kouakou, 2011}) \quad (\text{Éq.3})$$

avec :

x_i^{hor} : valeur moyenne annuelle calculée sur la période considérée ;

x_i^{ref} : valeur moyenne annuelle calculée sur la période de référence ;

i : l'horizon ;

Φ_i^{hor} : croissance ou décroissance relative des paramètres mensuels ou annuels futurs du bassin.

2.2.2. Simulation des débits du fleuve Bandama à Badikaha aux horizons 2050 et 2100

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

(a) - la préparation des données d'entrée et de sorties du modèle ;

(b) - le calage et la validation du modèle conceptuel GR2M avec les données réellement observées ;

(c) - la construction de séries climatiques réalistes (pluies et ETP) pour les horizons futurs (2031-2050 et 2081-2100) à partir des données climatiques effectivement observées sur la période de référence (1986-2006) et celles simulées sur les périodes 2031-2050 et 2081-2100.

(d) - Simulation des écoulements à l'aide du modèle conceptuel GR2M à partir des paramètres calés à l'étape (b) et des séries chronologiques construites à l'étape (c).

2.2.2.1. Préparation des données d'entrée et de sorties du modèle GR2M

✓ Données d'entrée

Les données d'entrées du modèle GR2M sont les précipitations moyennes mensuelles du bassin, l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle et les données de débits (lame d'eau) pour le calage et la validation du modèle. Etant donné que les paramètres du modèle sont très sensibles aux variations de ces données, leur qualité et leur utilisation dans le modèle requièrent des traitements appropriés. C'est dans ce sens que la méthode du krigeage a été appliquée pour le calcul des précipitations moyennes mensuelles sur le bassin versant à l'aide du logiciel Hydraccess.

✓ Données de sortie du modèle

Les lames d'eau observées, exprimées en millimètre ont pour but d'être comparées aux lames d'eau calculées par le modèle en phase de calage et de validation.

Le calcul de la lame d'eau mensuelle (LE) s'obtient par la formule suivante (Equation 4):

$$LE = 86,4 \times N_j \frac{Q}{S} \quad (\text{Yao, 2015}) \quad (\text{Éq.4})$$

où :

LE : lame d'eau écoulée sur le bassin versant (mm/mois)

Q : débit du cours d'eau mesurée à une station donnée (m³/s)

S : surface de la section du bassin versant à une station donnée (Km²)

86,4 : facteur de conversion

N_j : nombre de jours dans un mois donné

2.2.2.2. Calage et validation du modèle

Une fois la phase de préparation des données terminée, il s'en suit alors le calage et la validation du modèle. Le but de cette étape consiste à s'assurer que le modèle hydrologique représente le plus adéquatement possible les débits observés. Il consiste de ce fait à ajuster les paramètres du modèle de façon à ce que l'adéquation entre les débits simulés et observés soit maximale. Le critère le plus utilisé est celui de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité de l'ajustement et de faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements ont des ordres de grandeur différents.

Les paramètres du modèle retenus sont ceux dont la valeur minimise la fonction critère préalablement choisie.

Celle-ci est souvent égale à la somme des carrés des erreurs entre débit observé et débit simulé sur la période de calage. L'optimisation des paramètres du modèle s'est faite avec le solveur d'Excel.

Une fois le modèle «calé», l'on utilise les paramètres issus du calage et un autre jeu de données expérimentales pour effectuer la validation. Ainsi, la comparaison entre modèle et réalité terrain traduite par la valeur de la fonction critère permet alors de valider ou non le modèle. Les périodes de calage et de validation qui donnent les meilleures valeurs de Nash sont choisies de manière à ce qu'elles soient homogènes (sans rupture climatique présumée ni dans les séries de pluie ni dans les séries de débit) (Ardoin, 2004 ; Sighomnou, 2004).

L'expression de Nash est donnée selon l'équation 5 :

$$\text{Nash (Q)} = 100 \times \left[1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - Q_m)^2} \right] \quad (\text{Éq.5})$$

avec:

Qs: débit simulé

Qo: débit observé

Qm: débit moyen observé

La performance du modèle peut être jugée selon les valeurs prises par 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 performant lorsque 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 débits observés et simulés.

Cependant, ce critère présente l'inconvénient de donner beaucoup d'importance aux forts débits. Par conséquent, si l'on ne s'intéresse pas spécifiquement aux crues, on applique le critère de Nash aux racines carrées des débits.

2.2.2.3. Construction de séries climatiques réalistes aux horizons 2050 et 2100

❖ Correction des données de sortie du modèle RCA

Toute sortie de modèle climatique est généralement biaisée. Ainsi avant d'utiliser ces données pour la modélisation hydrologique, nous avons corrigé ces erreurs par la méthode de correction des biais (méthode du delta). Cette approche est appliquée le plus souvent sur les variables

climatiques en hydrologie, notamment la pluie, la température et de l'évapotranspiration (Moura et al., 2014). Elle définit certains facteurs de correction en comparant les propriétés statistiques des variables simulées sur la période de référence aux observations historiques. Ces facteurs sont ainsi appliqués aux simulations climatiques pour corriger les erreurs. La méthode corrige deux types d'erreurs (Kouakou, 2011) :

- **Erreurs additives : Pour les températures**

$$T_{scen,j,h} = T_{obs,j} + (T_{scen,m,h} - T_{ref,m}) \quad (\text{Éq.6})$$

avec :

$T_{scen,j,h}$: température journalière corrigée

$T_{obs,j}$: température journalière observée

$T_{scen,m,h}$: température moyenne mensuelle interannuelle de la période considérée

$T_{ref,m}$: température moyenne mensuelle interannuelle de la période historique

- **Erreurs multiplicatives : Pour les précipitations**

$$P_{scen,j,h} = P_{obs,j} \times \left(\frac{P_{scen,m,h}}{P_{ref,m}} \right) \quad (\text{Éq.7})$$

$P_{scen,j,h}$: pluie journalière corrigée

$P_{obs,j}$: pluie observée

$P_{scen,m,h}$: pluie moyenne mensuelle interannuelle de la période considérée

$P_{ref,m}$: pluie moyenne mensuelle interannuelle de la période historique

2.2.3. Estimation de la disponibilité en eau du Haut Bandama à Badikaha aux horizons 2050 et 2100

Les nouvelles séries climatiques futures générées, sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M pour simuler les écoulements attendus aux horizons 2031-2050 et 2081-2100. 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 observées. En effet, le modèle hydrologique nécessite certes des données climatiques, mais aussi les données de capacité en eau du sol.

➤ **Estimation des paramètres du bilan hydrologique aux horizons futurs**

Le bilan hydrologique permet de connaître les apports et les pertes en eau du bassin et donc de quantifier de façon globale les ressources en eau. En effet, il traduit de manière quantifiable le cycle de l'eau au niveau d'une région ou d'un bassin versant.

Les paramètres du bilan hydrologique ont été estimés sur la base de l'équation simplifiée qui se présente comme suit (Yao, 2015) :

Matériel et méthodes

$$P=Q+ETR+I \quad (\text{Éq.8})$$

La lame d'eau infiltrée (I) est déduite selon la formule donnée par l'équation 9 :

$$I= P- (ETR+Q) \quad (\text{Éq.9})$$

Les précipitations et le ruissellement sont connus, alors les valeurs de l'évapotranspiration réelle (ETR) sont déduites du modèle GR2M selon l'équation 10 suivante :

$$ETR=S1-S2 \quad (\text{Éq.10})$$

Avec :

S1 : niveau d'eau dans le réservoir sol après une pluie

S2 : niveau d'eau dans le réservoir après l'évapotranspiration.

Le matériel et les méthodes adoptées ainsi présentés nous ont permis d'obtenir des résultats que nous allons présenter et discuter dans la troisième partie.



TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET
DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Caractérisation des changements climatiques du bassin du haut Bandama aux horizons 2050 et 2100

3.1.1.1. Evaluation de la fiabilité des sorties du modèle climatique RCA4

➤ **Comparaison des précipitations moyennes mensuelles observées et simulées**

L'évolution comparée des précipitations simulées par le modèle et celles issues des observations sur la période de référence (1986-2005) montre de manière générale que le modèle reproduit le régime pluviométrique du bassin. La dynamique du climat est donc respectée (Figure 11). A Ferké, les projections du scénario RCP 4.5 montrent un décalage entre le maximum des précipitations observé au mois d'août et le maximum des précipitations simulé par le modèle RCA4. Par contre, le RCP 8.5 montre une coïncidence entre le maximum des précipitations observé et simulé. Dans l'ensemble, le modèle RCA4 sous-estime les hauteurs de pluie durant toute l'année ; à l'exception du mois de juillet où les hauteurs de pluie simulées sont supérieures à celles observées pour les deux scénarios. A la station de Korhogo, on a le même constat ; néanmoins les hauteurs de pluies de juin et août ont été surestimées par le RCP 4.5.

Ces résultats s'observent également au niveau des erreurs de simulations consignées dans le tableau IV. Pour les mois de la saison sèche (décembre, janvier et février), les erreurs de simulations sont de 100% au niveau des deux stations et pour les scénarii. Concernant les mois pluvieux (juin, juillet, août et septembre), les erreurs de simulation sont de l'ordre de -3,06 à 35,56%. On remarque également que les précipitations moyennes annuelles sont sous-estimées pour les deux scénarii avec des erreurs moyennes de -19,38%.

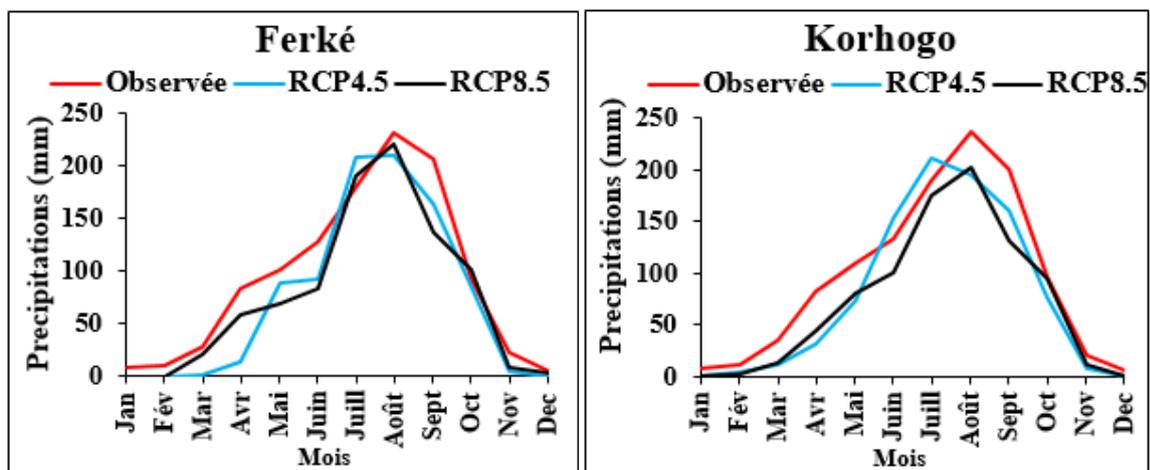


Figure 11: Comparaison des précipitations moyennes mensuelles observées et simulées :

A) Ferké, B) Korhogo sur la période 1986-2005

Résultats et discussion

Tableau IV: Evaluation des erreurs de précipitations simulées par le modèle comparativement aux précipitations observées aux stations de Ferké et Korhogo sur la période 1986-2005 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Mois	Station de Ferké					Station de Korhogo				
	Observée	RCP 4.5	Er (%)	RCP 8.5	Er (%)	Observée	RCP 4.5	Er (%)	RCP 8.5	Er (%)
Janvier	7,67	0,00	-100,0%	0,00	-100,0%	6,74	0,00	-100,0%	0,00	-100,0%
Février	9,34	0,00	-100,0%	0,27	-97,15%	10,19	3,92	-61,56%	1,71	-83,27%
Mars	27,58	1,76	-93,62%	21,18	-23,20%	35,21	11,80	-66,50%	12,24	-65,23%
Avril	83,85	13,76	-83,59%	57,67	-31,22%	81,28	30,97	-61,90%	43,27	-46,77%
Mai	100,60	88,32	-12,21%	68,40	-32,01%	109,10	73,23	-32,88%	80,86	-25,88%
Juin	128,86	91,76	-28,79%	83,03	-35,57%	133,05	152,84	14,88%	100,53	-24,44%
Juillet	180,56	208,31	15,37%	191,25	5,92%	189,93	211,58	11,40%	175,46	-7,62%
Août	231,25	209,55	-9,38%	220,86	-4,49%	237,42	194,07	-18,26%	201,32	-15,21%
Septembre	206,36	164,56	-20,26%	137,11	-33,56%	201,20	159,57	-20,69%	130,71	-35,03%
Octobre	92,97	84,65	-8,95%	100,84	8,46%	96,98	76,36	-21,27%	94,01	-3,06%
Novembre	21,82	5,33	-75,56%	7,71	-64,66%	20,22	7,11	-64,83%	11,12	-45,01%
Décembre	4,18	0,00	-100,0%	2,56	-38,60%	4,68	0,00	-100,0%	0,00	-100,0%
Moyenne Annuelle	1095,04	868,00	-20,76%	890,87	-18,64%	1126,01	921,44	-15,89%	851,23	-22,26%

➤ **Comparaison des températures moyennes mensuelles observées et simulées**

De façon générale, le modèle simule bien la dynamique saisonnière des températures sur le bassin (Figure 12). Toutefois, pour les deux scénarii et pour les deux stations analysées, le modèle surestime les températures jusqu'au mois de juin et au mois d'août.

Les écarts entre les températures observées et simulées sont faibles à Korhogo contrairement à ceux de Ferké (Tableau V et IV). Le modèle surestime les températures durant les mois les plus chauds de l'année. Par contre pendant, les mois humides, le modèle sous-estime les températures. A Ferké ces écarts sont de l'ordre de 4°C.

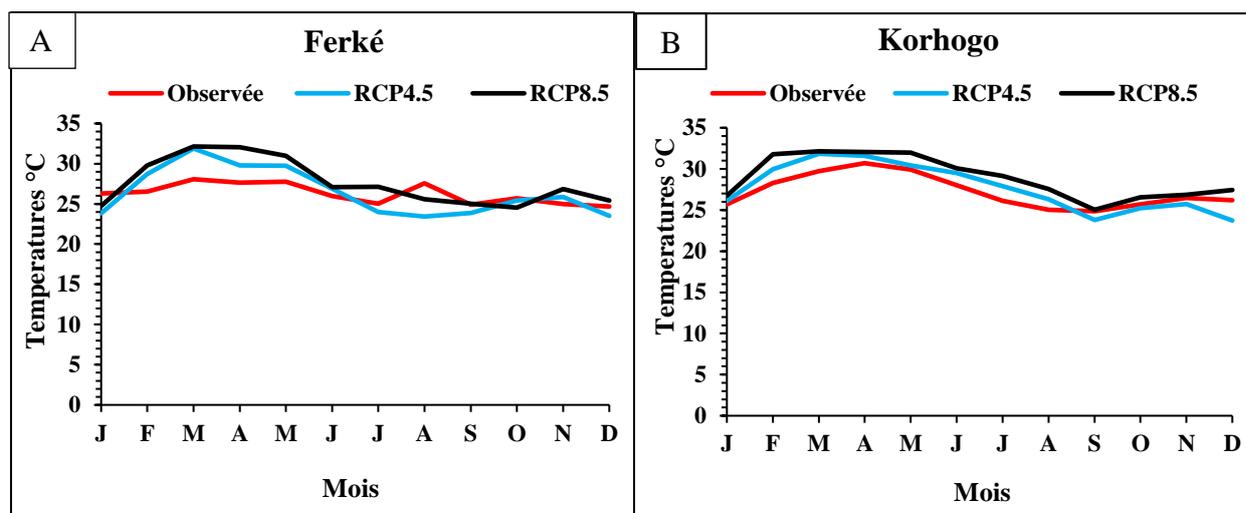


Figure 12: Comparaison des températures simulées et observées: A) Ferké ; B) Korhogo

Résultats et discussion

Tableau V: Evaluation des erreurs de températures simulées par le modèle comparativement aux précipitations observées sur la période 1986-2005 à Ferké

Mois	Observée	RCP 4.5	Er (%)	Er [°C]	RCP 8.5	Er (%)	Er [°C]
Janvier	26,30	24,83	-5,59%	-1,47	24,75	-5,87%	-1,54
Février	26,54	28,74	8,28%	+2,20	29,80	12,29%	+3,26
Mars	28,07	31,89	13,62%	+3,82	32,14	14,50%	+4,07
Avril	27,65	29,79	7,72%	+2,13	32,06	15,93%	+4,40
Mai	27,76	29,75	7,15%	+1,98	30,99	11,63%	+3,23
Juin	25,99	26,88	3,42%	+0,89	27,07	4,16%	+1,08
Juillet	25,03	24,01	-4,09%	-1,03	27,14	8,41%	+2,11
Août	27,58	23,43	-15,06%	-4,15	25,56	-7,31%	-2,02
Septembre	24,89	23,89	-4,03%	-1,00	25,03	0,57%	+0,14
Octobre	25,68	25,42	-1,02%	-0,26	24,54	-4,46%	-1,14
Novembre	25,00	25,87	3,46%	+0,86	26,86	7,43%	+1,86
Décembre	24,67	23,53	-4,65%	-1,15	25,43	3,07%	+0,76
Moy. Ann.	26,26	26,50	0,77%	+0,24	27,61	5,03%	+1,35

Tableau VI: Evaluation des erreurs de températures simulées par le modèle comparativement aux précipitations observées sur la période 1986-2005 à Korhogo

Mois	Observée	RCP4.5	Er (%)	Er [°C]	RCP8.5	Er (%)	Er [°C]
Janvier	25,70	26,12	1,63%	+0,42	26,75	4,09%	+1,05
Février	28,29	29,96	5,92%	+1,67	31,80	12,42%	+3,51
Mars	29,74	31,84	7,05%	+2,10	32,14	8,05%	+2,40
Avril	30,70	31,58	2,86%	+0,88	32,06	4,43%	+1,36
Mai	29,92	30,42	1,68%	+0,50	31,99	6,93%	+2,07
Juin	28,01	29,50	5,31%	+1,49	30,07	7,35%	+2,06
Juillet	26,10	27,90	6,87%	+1,79	29,14	11,64%	+3,04
Août	25,02	26,32	5,20%	+1,30	27,56	10,17%	+2,54
Septembre	24,85	23,78	-4,34%	-1,08	25,03	0,71%	+0,18
Octobre	25,70	25,22	-1,88%	-0,48	26,54	3,25%	+0,84
Novembre	26,46	25,71	-2,83%	-0,75	26,86	1,51%	+0,40
Décembre	26,20	23,73	-9,44%	-2,47	27,43	4,70%	+1,23
Moy. Ann.	27,22	27,67	1,50%	+0,45	28,95	6,27%	+1,72

3.1.1.2 Analyse de l'évolution des paramètres climatiques aux horizons 2050 et 2100

➤ Evolution des précipitations moyennes mensuelles aux horizons 2050 et 2100

Les variations du cycle mensuel des précipitations aux horizons 2031-2050 et 2081-2100 par rapport à la référence 1986-2005 sont consignées dans les tableaux VI et VII.

A la station de Ferké, les simulations du modèle selon le RCP 4.5 (Tableau VI), montrent que les mois de la saison des pluies (juin à août) connaîtront une augmentation générale sur les deux horizons analysés; alors que la tendance est à la baisse des pluies pour les mois secs (novembre à février). Les simulations du RCP 8.5 montrent une tendance similaire pour l'horizon 2031-2050 alors qu'à l'horizon 2081-2100, la tendance générale est à la baisse des pluies de tous les mois à l'exception des mois de juillet, août et octobre.

A Korhogo, les résultats des deux scénarios montrent une baisse généralisée de la pluie aux horizons futurs tous les mois de l'année à l'exception du mois de juillet (Tableau VII).

A l'échelle annuelle, on remarque qu'à la station de Ferké, les précipitations moyennes annuelles attendues dans le bassin du Haut Bandama vont augmenter de 6,85% à l'horizon 2031-2050 et baisser de -9,18% à l'horizon 2081-2100 selon le scénario RCP 4.5. Pour le RCP 8.5, les pluies augmenteront de 2,91% et baisseront de -4,34% à l'horizon 2081-2100. Les précipitations moyennes annuelles de Korhogo montrent une baisse au niveau de tous les horizons futurs et pour les deux scénarii.

Les résultats de l'évolution des précipitations des stations de Boundiali, M'bengué et Ouangolo sont présentés dans les annexes 1, 2 et 3.

Résultats et discussion

Tableau VII: Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à Ferké selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	1986-2005	RCP 4.5						RCP 8.5					
		2031-2050	$\Delta P1$ [%]	$\Delta P1$ [mm]	2081-2100	$\Delta P2$ [%]	$\Delta P2$ [mm]	2031-2050	$\Delta P1$ [%]	$\Delta P1$ [mm]	2081-2100	$\Delta P2$ [%]	$\Delta P2$ [mm]
Janvier	7,7	0	-100	-7,7	0	-99,6	-7,7	0	-100	-7,7	0	-100	-7,7
Février	9,3	5,5	-40,7	-3,8	0,2	-97,8	-9,1	0	-100	-9,3	0,1	-98,8	-9,2
Mars	27,6	28,3	2,7	0,7	1,1	-96,1	-26,5	1	-96,6	-26,6	0,8	-97,1	-26,8
Avril	83,8	23,6	-71,8	-60,2	13,7	-83,6	-70,1	10,6	-87,4	-73,2	9,5	-88,7	-74,3
Mai	100,6	76,5	-24	-24,1	57,8	-42,6	-42,8	26	-74,1	-74,6	61,8	-38,5	-38,8
Juin	128,9	173,5	34,7	44,6	152,3	18,2	23,4	123,3	-4,3	-5,6	128,6	-0,2	-0,3
Juillet	180,6	287,5	59,2	106,9	236,9	31,2	56,3	319,4	76,9	138,8	221	22,4	40,4
Août	231,2	237,7	2,8	6,5	207,6	-10,2	-23,6	252,3	9,1	21,1	293,8	27,1	62,6
Septembre	206,4	230,4	11,7	24	209,5	1,5	3,1	237	14,9	30,6	202,4	-1,9	-4
Octobre	93	97,4	4,8	4,4	104,8	12,7	11,8	138,3	48,7	45,3	109,7	18	16,7
Novembre	21,8	9,5	-56,5	-12,3	10,4	-52,2	-11,4	19	-12,9	-2,8	19,6	-10,3	-2,2
Décembre	4,2	0,1	-98,3	-4,1	0	-100	-4,2	0,1	-98,6	-4,1	0	-100	-4,2
Moyenne Annuelle	1095	1170,1	6,85	75,1	994,4	-9,18	-100,6	1126,9	2,91	31,9	1047,4	-4,34	-47,6

$\Delta P1$: différence de précipitation entre les horizons 1986-2005 et 2031-2050

$\Delta P2$: différence de précipitation entre les horizons 1986-2005 et 2081-2100

Résultats et discussion

Tableau VIII: Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à Korhogo selon les scenarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	1986-2005	RCP 4.5						RCP 8.5					
		2031-2050	$\Delta P1$ [%]	$\Delta P1$ [mm]	2081-2100	$\Delta P2$ [%]	$\Delta P2$ [mm]	2031-2050	$\Delta P1$ [%]	$\Delta P1$ [mm]	2081-2100	$\Delta P2$ [%]	$\Delta P2$ [mm]
Janvier	6,7	0	-100	-6,7	0	-99,6	-6,7	0	-100	-6,7	0	-100	-6,7
Février	10,2	0,2	-98,2	-10	1,3	-87,7	-8,9	0	-100	-10,2	0,3	-97,2	-9,9
Mars	35,2	7,9	-77,5	-27,3	3,2	-90,9	-32	1,4	-95,9	-33,8	1,2	-96,6	-34
Avril	81,3	22,6	-72,2	-58,7	14	-82,8	-67,3	16,3	-80	-65	17,4	-78,6	-63,9
Mai	109,1	58,9	-46	-50,2	70,5	-35,3	-38,6	34,3	-68,6	-74,8	58,9	-46	-50,2
Juin	133	155,8	17,1	22,8	104,8	-21,2	-28,2	147,1	10,6	14,1	105,6	-20,6	-27,4
Juillet	189,9	251,3	32,3	61,4	238,3	25,5	48,4	313	64,8	123,1	195	2,7	5,1
Août	237,4	210,8	-11,2	-26,6	189,5	-20,2	-47,9	226	-4,8	-11,4	290,9	22,5	53,5
Septembre	201,2	191,8	-4,7	-9,4	187,3	-6,9	-13,9	204,7	1,8	3,5	184,6	-8,3	-16,6
Octobre	97	88,7	-8,5	-8,3	86,8	-10,5	-10,2	117,9	21,6	20,9	95,6	-1,5	-1,4
Novembre	20,2	10,7	-47,1	-9,5	10,2	-49,7	-10	18,3	-9,7	-1,9	23,9	18,2	3,7
Décembre	4,7	0	-99,6	-4,7	0	-100	-4,7	0,2	-95,8	-4,5	0	-100	-4,7
Moyenne Annuelle	1126	998,8	-11,34	-127,2	906	-19,53	-220	1079,3	-4,14	-46,7	973,2	-13,57	-152,8

$\Delta P1$:différence de précipitation entre les horizons 1986-2005 et 2031-2050

$\Delta P2$: différence de précipitation entre les horizons 1986-2005 et 2081-2100

➤ **Evolution des températures moyennes mensuelles aux horizons 2050 et 2100**

Les températures des années à venir connaîtront une tendance générale à la hausse quel que soit le scénario considéré (Figure 14). A l’horizon 2081-2100, cet accroissement des températures serait plus important (Tableau VIII et IX). L’analyse des tableaux montre que :

- à la station de Ferké, l’horizon 2081-2100 serait le plus chaud avec une hausse des températures moyennes annuelles de 2,2 °C pour le scénario RCP 4.5 et de 3,3°C pour le scénario RCP 8.5.

- à Korhogo, les amplitudes annuelles varient de 0,8°C à 2,8°C à l’horizon 2081-2100.

L’analyse de la variation saisonnière au niveau des deux stations montre une hausse des températures tous les mois. Les amplitudes les plus élevées sont enregistrées au mois de décembre et janvier. A Ferké, la valeur maximale est de 5,6°C avec le scénario RCP 8.5. Ces constats sont les mêmes pour la station de Korhogo avec une valeur maximale de 4,5°C. En somme, notons que toutes les projections prévoient une hausse des températures mensuelles et annuelles avec des amplitudes variant de 0,10°C à 5,6°C.

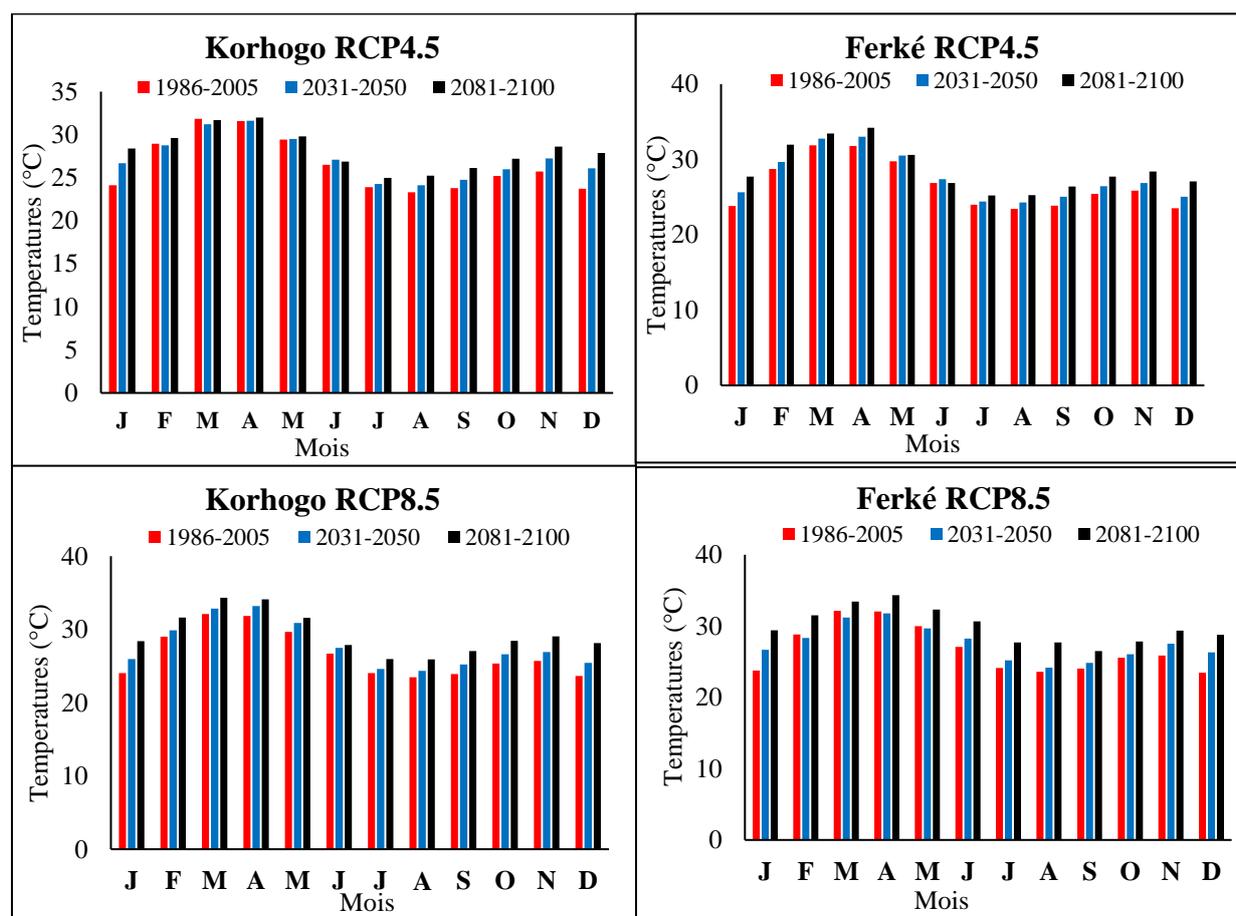


Figure 14: Gamme de variation moyenne des températures moyennes mensuelles aux horizons 2050 et 2100 à Ferké et Korhogo

Résultats et discussion

Tableau IX: Evolution de la température aux horizons 2050 et 2100 à Ferké selon les scenarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	1986-2005	RCP 4.5						RCP 8.5					
		2031-2050	$\Delta T1$ [%]	$\Delta T1$ [°C]	2081-2100	$\Delta T2$ [%]	$\Delta T2$ [°C]	2031-2050	$\Delta T1$ [%]	$\Delta T1$ [°C]	2081-2100	$\Delta T2$ [%]	$\Delta T2$ [°C]
Janvier	23,8	25,6	7,6	1,8	27,7	16,4	3,9	26,7	12,2	2,9	29,4	23,5	5,6
Février	28,7	29,7	3,5	0,9	32,0	11,5	3,2	29,3	2,1	0,5	31,5	9,8	2,7
Mars	31,9	32,8	2,8	0,9	33,5	5,0	1,6	32,2	0,9	1,0	33,4	4,7	2,3
Avril	31,8	33,0	3,8	1,2	34,2	7,5	2,4	31,8	0,0	-0,3	34,3	7,9	2,3
Mai	29,7	30,5	2,7	0,8	30,6	3,0	0,9	30,7	3,4	0,7	32,3	8,8	2,3
Juin	26,9	27,4	1,9	0,5	26,9	0,0	0,0	28,3	5,2	1,2	30,6	13,8	3,6
Juillet	24,0	24,4	1,7	0,4	25,2	5,0	1,2	25,2	5,0	1,1	27,7	15,4	3,6
Août	23,4	24,3	3,8	0,8	25,3	8,1	1,9	24,2	3,4	0,6	27,7	18,4	4,1
Septembre	23,9	25,1	5,0	1,2	26,4	10,5	2,5	24,8	3,8	0,8	26,5	10,9	2,5
Octobre	25,4	26,5	4,3	1,0	27,7	9,1	2,3	26,0	2,4	0,5	27,8	9,4	2,3
Novembre	25,9	26,9	3,9	1,0	28,4	9,7	2,6	27,5	6,2	1,7	29,4	13,5	3,5
Décembre	23,5	25,1	6,8	1,5	27,1	15,3	3,5	26,3	11,9	2,9	28,8	22,6	5,4
Moyenne Annuelle	26,6	27,6	3,8	1,0	28,7	7,9	2,2	27,7	4,1	1,1	30,0	12,8	3,3

$\Delta T1$: différence de température entre les horizons 1986-2005 et 2031-2050

$\Delta T2$: différence de température entre les horizons 1986-2005 et 2081-2100

Résultats et discussion

Tableau X: Evolution de la température aux horizons 2050 et 2100 à Korhogo selon les scenarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	1986-2005	RCP4.5						RCP8.5					
		2031-2050	$\Delta T1$ [%]	$\Delta T1$ [°C]	2081-2100	$\Delta T2$ [%]	$\Delta T2$ [°C]	2031-2050	$\Delta T1$ [%]	$\Delta T1$ [°C]	2081-2100	$\Delta T2$ [%]	$\Delta T2$ [°C]
Janvier	24,1	26,7	10,8	2,6	28,4	17,8	4,3	26,0	7,9	1,9	28,4	17,8	4,3
Février	29,0	28,8	-0,7	-0,2	29,6	2,1	0,6	29,9	3,1	0,9	31,6	9,0	2,6
Mars	31,8	31,2	-1,9	-0,6	31,7	-0,3	-0,1	32,8	3,1	0,7	34,3	7,9	2,2
Avril	31,6	31,6	0,0	0,1	32,0	1,3	0,4	33,2	5,1	1,4	34,1	7,9	2,2
Mai	29,4	29,5	0,3	0,1	29,8	1,4	0,4	30,9	5,1	1,2	31,6	7,5	1,9
Juin	26,5	27,1	2,3	0,6	26,9	1,5	0,4	27,5	3,8	0,8	27,9	5,3	1,2
Juillet	23,9	24,3	1,7	0,4	25,0	4,6	1,1	24,6	2,9	0,6	26,0	8,8	1,9
Août	23,3	24,1	3,4	0,8	25,2	8,2	1,9	24,3	4,3	0,9	25,9	11,2	2,5
Septembre	23,8	24,8	4,2	1,0	26,1	9,7	2,4	25,2	5,9	1,3	27,0	13,4	3,1
Octobre	25,2	26,0	3,2	0,8	27,2	7,9	2,0	26,6	5,6	1,3	28,4	12,7	3,1
Novembre	25,7	27,2	5,8	1,5	28,6	11,3	2,9	26,9	4,7	1,2	29,0	12,8	3,3
Décembre	23,7	26,1	10,1	2,4	27,9	17,7	4,1	25,4	7,2	1,8	28,1	18,6	4,5
Moyenne Annuelle	26,5	27,3	3,0	0,8	28,2	6,4	1,7	27,8	4,9	1,2	29,4	10,9	2,8

$\Delta T1$: différence de température entre les horizons 1986-2005 et 2031-2050

$\Delta T2$: différence de température entre les horizons 1986-2005 et 2081-2100

3.1.2 Simulation des écoulements aux horizons 2050 et 2100

3.1.2.1. Calage et validation du modèle

Le calage et la validation du modèle GR2M ont été réalisés respectivement sur les périodes 1980-1985 et 1986-1993 à la station Route Korhogo Badikaha. Les périodes retenues sont celles qui ont donné de meilleures performances de simulation des écoulements avec le modèle GR2M. Les résultats consignés dans le Tableau XI montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les débits observés et ceux calculés comme le témoigne les coefficients de Nash supérieur à 60%. Ces résultats numériques sont confirmés par une assez bonne similitude entre hydrogrammes observés et calculés (Figure 15).

Tableau XI: Résultats des calages et validations du modèle hydrologique GR2M

Paramètres		Calage	Validation
X1	X2	Période	Nash Q (%)
6,59	0,44	1980-1985	74,0
		Période	Nash Q (%)
		1986-1993	61,3

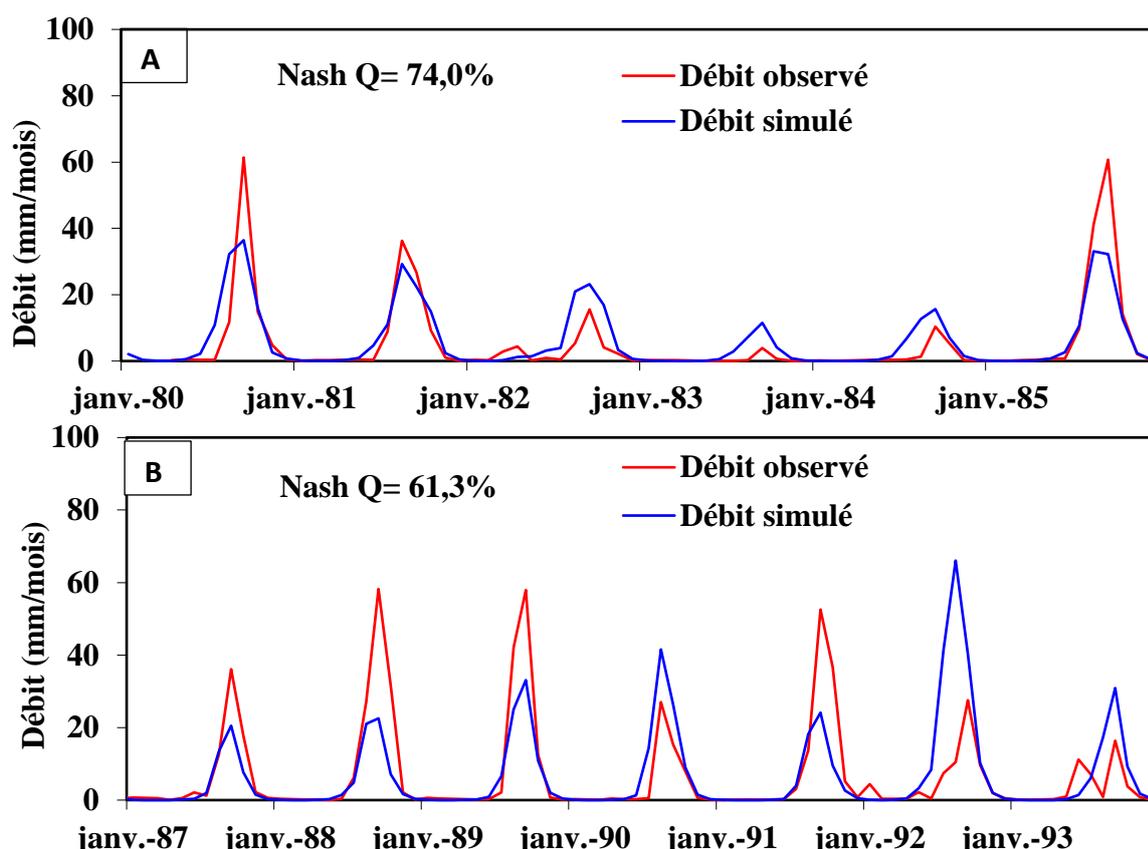


Figure 15: Calage et validation de GR2M à la station route Korhogo-Badikaha : A) Calage, B) validation

L'analyse des graphes obtenus lors de cette simulation montrent que la dynamique des écoulements est respectée. A la validation le modèle hydrologique GR2M, traduit de façon satisfaisante les hydrogrammes. Cependant, il sous-estime la lame d'eau écoulée sur les périodes 1988-1989 et l'année 1991. Par contre, il surestime les écoulements de la période 1992-1993 et l'année 1990. Au calage, des écarts existent entre les hydrogrammes observés et simulés sur presque toute la période d'étude.

3.1.2.2. Evolution des débits moyens mensuels aux horizons 2050 et 2100

La comparaison des hydrogrammes moyens mensuels des horizons 2031-2050 et 2081-2100 à celui de la période de référence (1986-2005) permet de voir si les variations annuelles de température et de précipitations induites par les changements climatiques s'accompagnent de modifications des régimes hydrologiques.

L'examen des débits moyens mensuels du Bandama à Badikaha simulés aux horizons 2031-2050 et 2081-2100 montre que les volumes d'eau écoulés seront en baisse les années à venir quel que soit le scénario considéré (Figure 16). En termes de dynamique, il n'y a pas de modification du régime hydrologique : les périodes des basses eaux et des hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période 1986-2005. Le mois de septembre demeure le mois où se produit les pics de crues jusqu'à l'horizon 2081-2100. Toutefois, les modifications portent essentiellement sur les volumes d'eau écoulés. Pour le RCP 4.5, les volumes d'eau écoulés vont baisser à l'horizon 2031-2050 soit (31 mm) ; par la suite ces écoulements connaîtront une reprise (augmentation) de l'ordre de 28,03 mm par rapport à l'horizon 2031-2050.

Pour le RCP 8.5, les simulations montrent que les volumes d'eau écoulés vont baisser sur tous les horizons. A l'horizon 2031-2050, on observe un décalage au niveau de la date d'apparition de pic de crues. En effet, au cours de cette période, la montée des eaux qui a lieu initialement en septembre pourrait se déclencher désormais en août. Concernant l'horizon 2081-2100, on constate une coïncidence des crues avec cependant, une baisse des volumes de 22,12 mm an⁻¹.

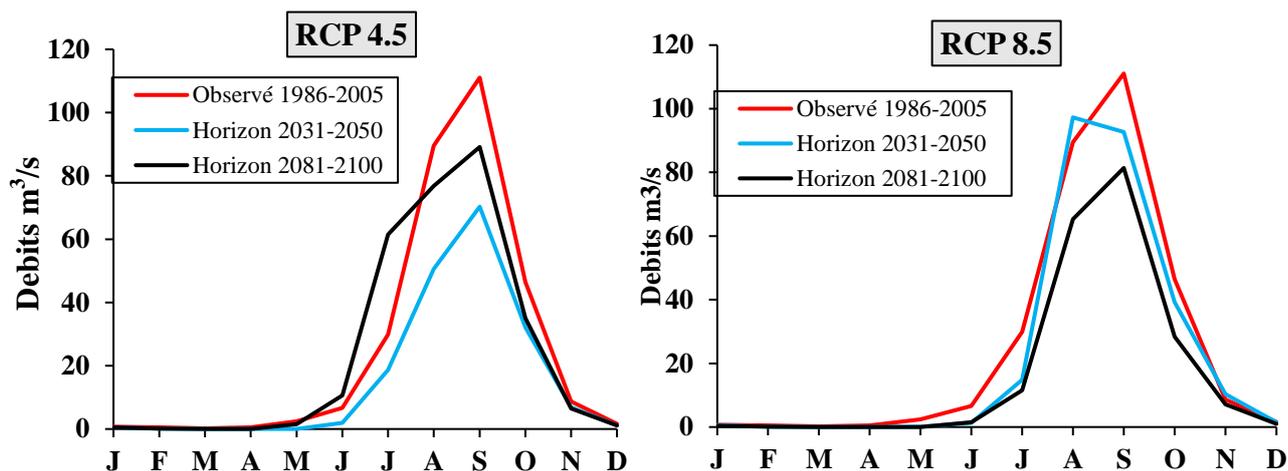


Figure 16: Evolution des débits moyens mensuels des périodes 1986-2005 (référence), 2031-2050 et 2081-2100 de la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha

3.1.3. Analyse de la disponibilité en eau du bassin aux horizons 2050 et 2100

3.1.3.1. Evolution de la recharge aux horizons 2050 et 2100

Au cours du 21^{ème} siècle, la recharge annuelle sur le bassin versant du Haut Bandama pourrait baisser considérablement (Figure 17). Pour le scénario RCP 4.5, l'infiltration passe de 271,7 mm an⁻¹ sur la période 1986-2005 à 177,4 mm an⁻¹ à l'horizon 2031-2050 soit une baisse de 94,3 mm. En revanche, à l'horizon 2081-2100, on constate, une augmentation des infiltrations de 52,9 mm par rapport à l'horizon 2031-2050. Contrairement au scénario RCP 4.5, la tendance d'évolution est à la baisse généralisée des infiltrations jusqu'à la fin du siècle. En effet, les infiltrations pourraient passer de 271,4 (1986-2005) mm an⁻¹ à 130,8 mm an⁻¹ à l'horizon 2081-2100. Cette baisse est estimée à 140,9 mm. Il apparaît clairement que vers la fin du 21^{ème} siècle, la recharge des nappes via les précipitations sera réduite de moitié sur le bassin versant dans son ensemble selon le scénario RCP 8.5.

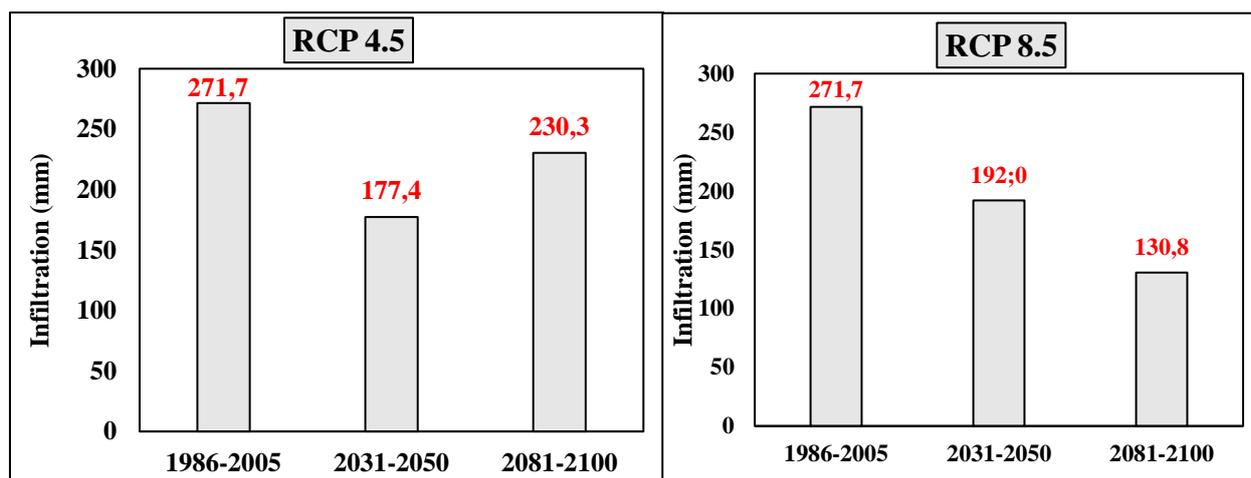


Figure 17: Evolution des infiltrations sur le bassin versant du Haut Bandama

3.1.3.2. Analyse des paramètres du bilan hydrologique

Les quatre principaux paramètres du bilan hydrologique sont les hauteurs de pluies annuelles, les évapotranspirations réelles (ETR), les lames d'eau ruisselées et infiltrées (Figure 18). L'évolution de la pluie sera marquée par une irrégularité des hauteurs de pluie tombée. Les projections selon le scénario RCP 4.5, montrent une baisse des pluies à l'horizon 2031-2050 puis une reprise à l'horizon 2081-2100. Il en est de même pour les autres paramètres du bilan hydrologique. En effet, l'ETR était de 899,5 mm en 1986-2005, elles passent à 789,1 (2031-2050) puis à 813,6 mm 2081-2100. Au niveau des écoulements, les volumes d'eau écoulés passent de 79,9 mm (2031-2050) à 76,9 mm (2081-2100). Pour les infiltrations, elles étaient estimées à 271,7 mm en 1986-2005, elles passent à 177,4 (2031-2050) puis à 230,3 mm de 2081-2100.

Concernant, le RCP 8.5, les deux horizons seraient marqués par une baisse des écoulements (débits et infiltrations) et de l'ETR du fait de la hausse des températures précédemment soulignée. La baisse du ruissellement est de 22,1 mm an⁻¹ soit 27,68% celle des infiltrations à l'alimentation des cours d'eau de 140,9 mm an⁻¹ soit 51,18% (Tableau XII).

Résultats et discussion

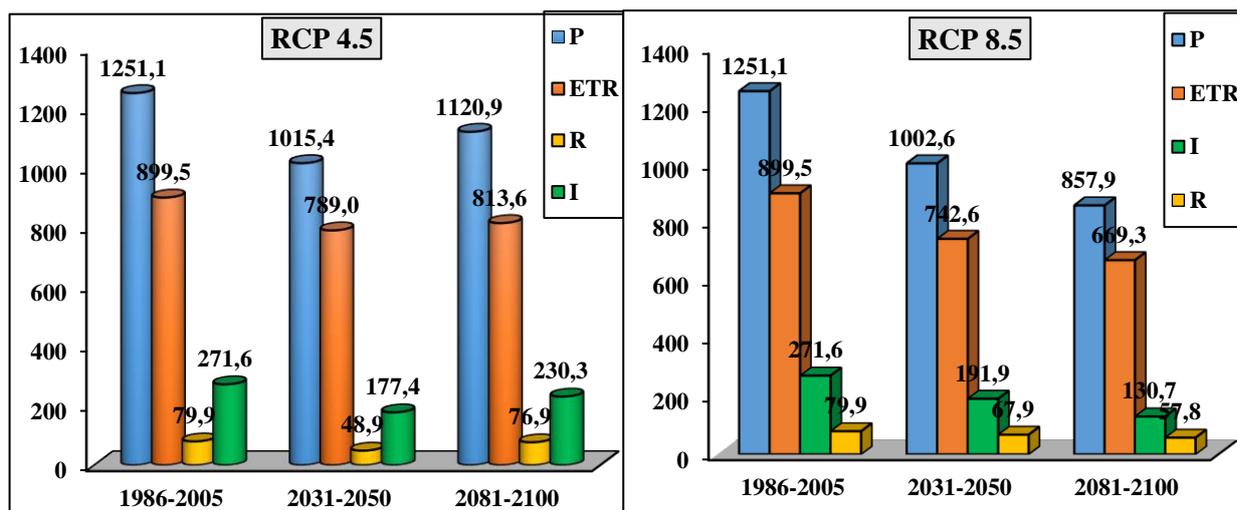


Figure 18: Evolution des paramètres du bilan hydrologique dans le bassin versant du Haut Bandama

Tableau XII : Taux de variations des paramètres du bilan hydrologique par rapport à la référence (1986-2005) sur le bassin du Haut Bandama selon RCP 4.5 et 8.5

Paramètres	2031-2050		2081-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Pluie (%)	-18,84	-19,86	-10,41	-31,43
ETR (%)	-12,28	-17,44	-9,55	-25,59
Lame d'eau (%)	-38,79	-14,93	-3,72	-27,68
Infiltration (%)	-34,68	-29,34	-15,22	-51,87

3.2. DISCUSSION

Les résultats de la comparaison des températures et précipitations moyennes mensuelles simulées par le modèle RCA4 avec celles observées a permis de vérifier la fiabilité du modèle climatique. Le modèle RCA4 traduit assez fidèlement les variations saisonnières des températures et des précipitations du bassin versant du Haut Bandama où le climat comporte deux saisons dont une pluvieuse et une sèche (Kouassi *et al.*, 2018). En revanche, il simule mieux les températures par rapport aux précipitations. En effet, les biais moyens annuels calculés des températures sont faibles (moins de 2°C) selon les deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5). Le modèle surestime les températures moyennes annuelles, respectivement de 0,77 % et 5,03 % selon RCP 4.5 et RCP 8.5 à Ferké. Egalement, à Korhogo il les surestime respectivement, de 1,5 % et 6,27 % selon RCP 4.5 et RCP 8.5. Au niveau mensuel, les erreurs maximales commises sont respectivement, de 13,62 % en mars et 15,93 % en avril selon RCP 4.5 et RCP 8.5 à Ferké. A Korhogo, elles sont respectivement de 7,05 % en mars et 12,42 % en février selon RCP 4.5 et RCP 8.5. En revanche, le modèle sous-estime les températures au cours des mois pluvieux. Ces faibles incertitudes s'expliquent par le fait qu'en absence de hautes montagnes, les températures ont une variabilité spatiale relativement homogène (Jung, 2006). Contrairement aux températures, les précipitations sont simulées par le modèle avec des erreurs moyennes relativement importantes. En effet, la comparaison des précipitations observées et celles simulées par le modèle donne des erreurs moyennes qui varient de -20,76 % à -18,65 % à Ferké et de -15,89 % à -22,26 % à Korhogo selon les deux scénarios. Les erreurs moyennes produites par le modèle RCA4 sont dues à la paramétrisation des phénomènes physiques (Giorgi *et al.*, 2004 ; Seth *et al.*, 2006) tels que les précipitations convectives, les conditions aux limites et les états de surface. L'une des sources d'erreur dans cette étude est la non prise en compte des changements d'état de surface. En effet, la dynamique des interactions entre la couverture végétale et atmosphère influence fortement le climat à travers les mécanismes de rétroactions (Hulme *et al.*, 2001 ; Jung, 2006). Enfin, les données observées ayant servi à comparer celles simulées peuvent comporter également des erreurs de mesures (Giorgi *et al.*, 2001 ; Washington *et al.*, 2004).

En ce qui concerne les taux de variation, les résultats ont montré que les températures du bassin du Bandama vont augmenter à l'avenir. Les conclusions sont conformes à la dernière version du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans cette étude, la température de tous les mois pourrait augmenter dans les deux scénarios, mais il sera plus élevé dans le RCP 8.5 que dans le RCP 4.5. Les travaux de Diffenbaugh *et al.*, (2012) identifient l'Ouest tropical Africain, point chaud du changement climatique pour les RCP 4.5 et 8.5 et

Résultats et discussion

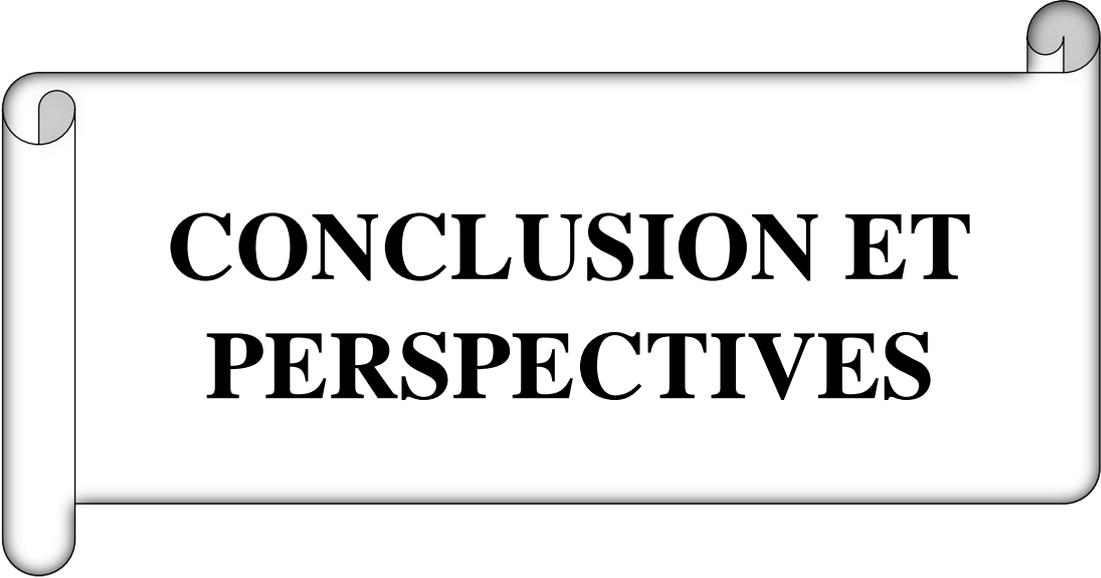
prévoit que les changements se produiront plus tôt (fin des années 2030 à début des années 2040) dans ces régions. Egalement, Soro *et al.*, (2017) montrent que selon le scénario RCP 8.5, le bassin du fleuve Bandama connaîtra une hausse de température d'environ 1,5°C d'ici 2025. Dans le bassin du Haut Bandama à Badikaha, les températures mensuelles pourraient varier de 1,2°C à 3,3°C d'ici 2050. Une augmentation plus prononcée de la température est prévue en 2081-2100, avec des prévisions annuelles de température environ 20 % plus élevées que la température de référence. Pour le RCP 4.5, les changements de températures mensuelles peuvent varier de 1,2°C en septembre à 2,4°C en avril avec une moyenne annuelle d'environ 2°C d'ici 2050. L'augmentation des températures sera plus importante dans le bassin selon le scénario RCP 8.5 dans les années 2081 et 2100. Plusieurs études en Côte d'Ivoire et dans la sous-région montrent un réchauffement de 2 et 6 °C au-dessus de la ligne de base vers fin du XIXe siècle (Kouakou, 2011 ; Soro *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2018 ; Goe, 2019). Comme dans le bassin hydrographique du Bandama, les travaux d'Ayele *et al.* (2016) ont montré les hausses des températures prendrons de l'ampleur pour les scénarios d'émission RCP 8.5 que les scénarios d'émission moyennement faibles du RCP 4.5.

Les projections effectuées sur les précipitations donnent une diminution de la pluviométrie annuelle de 4,34% à 9,18% à l'horizon 2031-2050 et un accroissement de 2,91% à 6,85% à l'horizon 2081-2100, respectivement selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à Ferké. En revanche, à Korhogo elles donnent une diminution de 4,14% à 13,57% à l'horizon 2031-2050 et 11,34% à 19,53% à l'horizon 2081-2100 respectivement selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. A l'échelle mensuelle et spatiale, l'on assiste tantôt à une augmentation, tantôt à une baisse suivant les mois et l'endroit considéré. Les travaux de Soro *et al.* (2017) ont montré également qu'une baisse de la pluviométrie serait enregistrée dans la zone. Toutefois, l'augmentation des précipitations des mois humides pourrait être plus importante dans un avenir lointain (2081-2100) que dans un avenir proche (2031-2050).

De plus, la performance du modèle hydrologique a également été abordée dans cette étude. A la lumière des résultats du calage et de la validation, il ressort alors que le modèle GR2M produit, dans l'ensemble, des performances satisfaisantes. Les critères de Nash obtenus en calage (1980-1985) et en validation (1986-1993) sont respectivement de 74,0 % pour le calage et 61,30 % pour la validation avec les données de la station hydrométrique route Korhogo-Badikaha. L'amélioration des valeurs du critère de Nash à la validation qu'au calage est la preuve de la fiabilité des résultats comme prouvé par les travaux de Soro *et al.* (2017) sur ce même le même bassin. En phase de validation, on observe que le critère de Nash se dégrade,

cela peut s'expliquer par le fait que cette station étant située en aval du bassin subit les prélèvements effectués en amont (retenue d'AEP, barrage hydroagricole, etc.). En effet, Djellouli *et al.* (2015) ont noté qu'en l'absence d'aménagements hydrauliques les débits observés sont reproduits de façon satisfaisante. Par ailleurs, le modèle GR2M calé et validé a permis d'effectuer les simulations sur la période 1986-2005. Ainsi, les principaux paramètres du bilan hydrologique que sont les hauteurs de pluies annuelles, l'évapotranspiration réelle (ETR), la lame d'eau ruisselée et infiltrée ont été évaluées. Ce bilan montre que l'ETR est le paramètre le plus dominant avec une valeur de 899,5 mm/an, soit 71,90 % des précipitations. L'importance de ce terme sur le bassin versant du Haut Bandama est due à la mise à nu des sols due à l'agriculture et à la destruction du couvert forestier (Yao, 2019). Les résultats de cette étude se situent dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus par Soro *et al.* (2017), Goe (2019), et Yao (2019) respectivement sur les bassins de la Lobo et du Bandama. A la suite de l'ETR, vient par ordre d'importance la lame d'eau infiltrée. L'infiltration du bassin du Haut Bandama est estimée à 271,6 mm/an (21,71 % des précipitations). Cette valeur s'intègre bien dans le ratio observé par la plupart des études menées dans d'autres parties de la Côte d'Ivoire (Kouassi, 2007 ; Dibi, 2008 ; Kanohin, 2010 ; Kouakou, 2011 ; Mangoua, 2013). Les valeurs de recharges estimées dans ces études sont généralement comprises entre 10 % et 25 % des précipitations.

La simulation des paramètres climatiques aux horizons 2031-2050 et 2081-2100 a permis de prévoir à l'horizon le comportement hydrologique du bassin versant du Haut Bandama soumis aux changements climatiques. L'analyse de ces projections montre qu'il se produirait des changements importants dans le bassin du Haut Bandama d'ici à 2100 comme prévu dans les bassins de la Comoé (Yéo, 2017) de Sassandra (Coulibaly *et al.*, 2018) et Bandama (Soro *et al.*, 2017) qui entraîneraient une baisse des écoulements superficiels et souterrains à l'horizon 2031-2050. En dépit des variations de la dynamique des écoulements du Haut Bandama, le régime hydrologique reste inchangé. Ces perturbations du débit ont été observées par Kouassi *et al.* (2018) dans le bassin du Haut Bandama. La baisse de l'infiltration a également été révélée par les travaux de Goe (2019) dans le bassin de la Lobo à Nibehibé qui ont annoncé une diminution de 50 % de la lame d'eau infiltrée sur l'ensemble du bassin.



**CONCLUSION ET
PERSPECTIVES**

Conclusion

Cette étude a pour objectif d'évaluer les tendances d'évolutions des précipitations et des températures futures et leurs impacts sur les ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama. Pour ce faire, la démarche méthodologique s'est appuyée sur la caractérisation des changements climatiques à partir des sorties du modèle climatique régional RCA4, les données d'observation et la modélisation pluie-débit.

Les résultats de l'analyse de la fiabilité du modèle RCA4 montre que le modèle simule assez bien les paramètres météorologiques avec, toutefois, des erreurs. L'analyse des taux de variation des pluies et de températures des horizons futurs (2031-2050 et 2081-2100) par rapport à la période de référence 1986-2005 montre que les températures vont augmenter en moyenne de 1°C à 3,3°C respectivement selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Pour les pluies, les simulations prévoient une augmentation de 2,91% à 6,85% ou une baisse de 4% à 19,53% selon le type de scénario analysé.

La robustesse du modèle hydrologique GR2M a été évaluée dans cette étude afin d'estimer les effets des changements climatiques sur les écoulements. Le modèle hydrologique GR2M a été calé et validé à la station hydrométrique route Korhogo Badikaha. Le calage et la validation du modèle ont donné des critères de Nash satisfaisants estimé à 74,0 % pour le calage et 61,30 % pour la validation.

L'analyse de l'évolution des débits des horizons futurs (2031-2050 et 2081-2100) montre que les volumes d'eau écoulés seront en baisse les années à venir quel que soit le scénario considéré. En termes de dynamique, il n'y a pas de modification du régime hydrologique : les périodes des basses eaux et des hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période 1986-2005. Pour le RCP 4.5, les volumes d'eau écoulés vont baisser à l'horizon 2031-2050 soit (31 mm) ; par la suite ces écoulements connaîtront une reprise (augmentation) de l'ordre de 28,03 mm par rapport à l'horizon 2031-2050. Pour le RCP 8.5, les simulations montrent que les volumes d'eau écoulés vont baisser sur tous les horizons. A l'horizon 2031-2050, on observe un décalage au niveau de la date d'apparition de pic de crues.

Le bilan hydrologique effectué sur la période 1986-2005 a révélé une pluviométrie moyenne de 1251 mm et une perte par évapotranspiration réelle de 899,5 mm soit 71,90 % des précipitations. La lame d'eau ruisselée et infiltrée représente respectivement 79,9 mm et 271,66 mm, soit 6,38 % pour le débit et 21,71 % ce qui correspond à un taux de 28,09 % des précipitations. Comparativement à ce bilan de la période 1986-2005, l'horizon 2031-2050 enregistrera une baisse de la lame d'eau écoulée, infiltrée et l'évapotranspiration.

Cependant, le modèle prévoit une légère baisse des écoulements au détriment de la lame d'eau infiltrée à l'horizon 2081-2100 selon le scénario RCP 8.5.

Conclusion

Cette étude, loin de traiter tous les enjeux liés aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eaux dans le bassin versant du Haut Bandama, ouvre la voie à plusieurs perspectives en vue d'éviter des problèmes liés à la quantité d'eau dans le bassin. Il est question de :

- ✓ approfondir l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans le bassin versant du Haut Bandama à l'aide de modèle distribué qui prend en compte l'état physique et qui intègre les barrages de la zone d'étude ;
- ✓ mettre en place un modèle climatique régional unique à la Côte d'Ivoire voire à la zone Nord pour mieux traiter les phénomènes de changements climatiques.
- ✓ faire une étude approfondie des potentialités en eau souterraine dans les complexes sucriers de Ferkessédougou.



REFERENCES

Références

- Adiaffi B., Wango T.E., Gnamba F.M., Kpan O.J.G. & Baka D. (2016). Analyse de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Katiola. *International Journal of Engineering Science Invention*, 12(5) : 38–45.
- Avenard J.M. (1992). Aspect de la géomorphologie. In : *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM*, 50, Paris (France) : 11–72.
- Benyahya L., Daigle A., Caissie D., Beveridge D. & St-Hilaire A. (2009). Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada. Rapport de recherche R1057, Canada, 67 p.
- Ben-Zvi A. (1987). Indices of hydrological drought in Israel. *Journal of Hydrology*, 92(1) : 179–191.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire granitique de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat Ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, (Cocody, Côte d'Ivoire), 479 p.
- Cassiamani C., Morgillo A., Marchesi S. & Pavan V. (2007). Monitoring and forecasting drought on a regional scale : Emilia Romagna Region. *Water Science and Technology*, 62 : 29–48.
- Catalogne C. (2012). Amélioration des méthodes de prédéterminations des débits de références d'étiages en des sites peu ou non jaugés, Thèse de Doctorat d'Université de Grenoble, France, 143 p.
- CCC UE/CI (2013). Études APD et élaboration de DAO pour la sécurisation des ressources en eau des complexes sucriers de la Côte d'Ivoire, (Zuénoula, Ferkessedougou, Côte d'Ivoire), 113 p.
- Dkengne S. P. (2006). Modélisation et prévision des débits naturels journaliers du bassin versant de la Sanaga à la station de contrôle de Songmbengue. Rapport de Master, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, Cameroun, 101 p.

Références

- Doucet-Généreux P.L. (2015). Simulation des débits d'étiages dans un concept de changement climatique : incertitudes liées au choix du modèle et au critère de calage. Mémoire de Projet de Maîtrise Spécialité en Génie Civil, Département de génie civil, Université de Sherbrooke (Canada), 103 p.
- FAO/ROA (2001), Water harvesting in western and central Africa. FAO Regional Office for Africa, 119p.
- Fossou R.M.N., Lasm T., Soro N., Soro T., Soro G., De Lasme O.Z., Onetié O.Z. & Orou R. (2015). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal*, 21 : 97–120.
- Garcia F. (2016). Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage, Thèse de Doctorat en Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (France), 222 p.
- GIEC (2015). Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève (Suisse), 161 p.
- Goula B.T.A., Savané 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*, 7(1) : 1–12.
- Goula, Soro B.T.A., Kouassi E.G., Srohourou W. & Bernard (2012). Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), *Revue des sciences hydrologiques*, 57(6) : 1067–1080.
- INS (2014). Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) Résultats globaux. INS (Abidjan, Côte d'Ivoire), 22 p.
- Jean-Baptiste K.Y. (2015). Extension et développement des superficies irriguées en goutte à goutte à SUCAF-CI au Nord de la Côte d'Ivoire : Quelle stratégie ? Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 124 p.
- Jourda J.P.R. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire.

Références

- Thèse de Doctorat d'État Ès Sciences, Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398 p.
- Konan E.A., Péné C.B. & Dick E. (2017). Caractérisation agro-climatique du périmètre sucrier de Ferké 2 au Nord de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 116(1) : 11-32.
- Koffi, B., Kouadio, Z.A., Kouassi, K.H., Yao, A.B., Sanchez, M., Kouassi, K.L. (2020). Impact of meteorological drought on streamflows in the Lobo river catchment at Nibéhibé, Côte d'Ivoire. *Journal of Water Resource and Protection*, 12 : 495-511.
- Kouakou, K.E. 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. Ph.D. Thèse, Université Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2011.
- Kouamé K.C. (2019). Optimisation des réseaux d'irrigation du périmètre irrigué de Sucaf-Ci (6 846 ha). Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (Ouagadougou, Burkina Faso), 151 p.
- Kouassi A.M., Assoko A.V.S., Kouakou K.E., Djé K.B., Kouamé K.F. & Biémi J. (2017). Analyse des impacts hydrologiques de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 31 : 19-40.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Biémi J. (2013). Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 16 : 121–138.
- Kouassi A.M., Nassa R.A.-K., Yao K.B., Kouamé K.F. & Biémi J. (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, 31(2) : 147–160.
- Kouassi K.L., Wognin V.I., Gnagne T., N'go Y. A., Courivaud J-R., Kassy P., Démé M. & Aka K. (2007). Caractérisation des sables et morphologie du fond du lac du barrage hydroélectrique de Taabo (Côte d'Ivoire). *Sciences et Nature*, 4 (1) : 93 - 103.
- 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.

Références

- Lebel T. & Vischel T. (2005). Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(2) : 29–38.
- López-Moreno, J.I., et al. (2013) Hydrological response to climate variability at different time scales : A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477 : 175-188.
- Machard de Gramont (2010). Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers.in : *Guide méthodologique*. Agence Française de Développement, France, 120 p.
- McKee T.B., Doesken N.J. & and Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Eighth Conference on Applied Climatology*, 17-22 January 1993, Anaheim California, 6 p.
- Mekhloufi N. (2014). Prédétermination et prévision des étiages des oueds de l'Algérie septentrionale. Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Magistère, Spécialité Hydraulique, Option : Aménagement Hydraulique en zones arides, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 120 p.
- Mishra A.K., Desai V.R. & Singh V.P. (2007). Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(6) : 626–638.
- Nalbantis I. & Tsakiris G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5) : 881–897.
- Nshimirimana G. (2010). Caractéristiques du barrage-aménagement hydroagricole de moutori (dano) et scénarios d'utilisation de l'eau pour une irrigation efficiente et durable. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (Ouagadougou, Burkina Faso), 64 p.
- Péné C.B., Chopart J.L. & Assa A. (1997). Gestion de l'irrigation à la parcelle en culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) sous climat tropical humide, à travers le cas des régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 8(2) : 87–98.
- Péné C.B. & Assa A.D. (2003). Variabilité interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 14(1) : 43–52.
- Odada O.E. (2006), Freshwater resources of africa: major issues and priorities. *Global Water News*

Références

- GWSP*, **3**, 1–12.
- Soro G.E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 172 p.
- Soro G.E., Anouman D.G.L., Goula Bi T.A., Shrorou B. & Savané I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, **18** : 107–124.
- Soro T.D., Kouakou B.D., Kouassi E.A., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio K.E., Yéi M.-S.O. & Soro N. (2013). Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Vertigo*, **13**(3) : 1–22.
- Soro, E.G., Yao, A.B., Kouame, M.Y. & Goula, B.T.A. (2017). Climate Change and its Impacts on Water Resources in the Bandama Basin, Côte D'ivoire. *Hydrology*, **4**(1) : 1-13
- 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.
- Tate & Lyle (1975). Étude pédologique de la région comprise entre les rivières Waha et Farakwo en Côte d'Ivoire. *Hunting Technical Services Limited*, **15** : 99-115.
- Tsanang T.P.R. (2016). Diagnostic de système d'irrigation dans les parcelles irriguées, SUCAF-CI. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement (Ouagadougou, Burkina Faso), 99 p.
- UNESCO (2020). L'eau, une responsabilité partagée. Rapport Mondial des Nations Unies sur la Mise en Place des Ressources en Eau, édition UN WATER, (Côte d'Ivoire), 12 p.
- 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.

Références

Yao F., Ouattara I., Kouakou E., Savane I., Reynard E. & Fallot J.M. (2018). Analyse de la variabilité climatique dans le bassin versant agricole du Bandama blanc, Nord de la Côte d'Ivoire. *Association Internationale de Climatologie*, 12 : 339–404.



ANNEXES

Annexe 1 : Evolution de la pluviométrie à Boundiali aux horizons 2050 et 2100 selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	RCP 4.5					RCP 8.5			
	1986-2005	2031-2050	ΔP1%	2081-2100	ΔP2%	2031-2050	ΔP1%	2081-2100	ΔP2%
Janvier	3,3	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0
Février	10,3	0,0	-99,6	0,1	-98,8	0,1	-99,0	0,0	-100,0
Mars	45,5	1,1	-97,5	4,7	-89,7	0,5	-99,0	0,7	-98,4
Avril	115,5	9,5	-91,8	8,8	-92,4	17,6	-84,8	11,0	-90,5
Mai	144,2	61,2	-57,6	82,0	-43,1	59,6	-58,7	42,6	-70,5
Juin	152,6	115,4	-24,3	142,9	-6,3	108,8	-28,7	124,9	-18,2
Juillet	255,3	262,4	2,8	286,8	12,4	206,7	-19,0	339,5	33,0
Août	312,5	231,0	-26,1	202,2	-35,3	267,7	-14,3	257,3	-17,7
Septembre	228,1	195,9	-14,1	230,0	0,8	184,0	-19,3	232,9	2,1
Octobre	149,5	94,7	-36,7	92,8	-37,9	97,9	-34,5	117,4	-21,5
Novembre	29,6	9,6	-67,4	9,3	-68,7	12,0	-59,5	19,5	-33,9
Décembre	4,9	0,0	-100,0	0,5	-89,4	0,0	-100,0	0,2	-95,7
Moyenne									
Annuelle	1451,2	980,8	-32,41	1060,2	-26,94	954,7	-34,21	1146,0	-21,03

Annexe 2 : Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à M'Bengué selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	RCP 4.5					RCP 8.5			
	1986-2005	2031-2050	$\Delta P1\%$	2081-2100	$\Delta P2\%$	2031-2050	$\Delta P1\%$	2081-2100	$\Delta P2\%$
Janvier	0,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0
Février	26,9	22,5	-16,2	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0
Mars	40,7	25,2	-38,1	1,5	-96,2	0,4	-99,0	0,6	-98,5
Avril	169,3	123,6	-27,0	7,4	-95,6	13,8	-91,8	6,9	-95,9
Mai	197,3	116,9	-40,7	87,5	-55,6	48,7	-75,3	25,6	-87,0
Juin	188,9	170,3	-9,9	163,9	-13,3	117,6	-37,8	126,5	-33,0
Juillet	220,2	258,3	17,3	318,0	44,4	254,9	15,8	359,3	63,1
Août	302,2	244,7	-19,0	232,8	-23,0	291,5	-3,5	275,2	-8,9
Septembre	297,3	228,1	-23,3	258,8	-12,9	205,3	-30,9	285,2	-4,1
Octobre	128,3	100,3	-21,8	100,2	-21,9	107,9	-15,9	118,1	-8,0
Novembre	16,4	11,5	-29,9	7,3	-55,8	13,0	-20,6	16,0	-2,6
Décembre	0,1	0,0	-100,0	0,1	-38,3	0,0	-100,0	0,0	-68,9
Moyenne									
Annuelle	1587,6	1301,5	-18,02	1177,5	-25,83	1053,2	-33,66	1213,4	-23,57

Annexe 3 : Evolution de la pluviométrie aux horizons 2050 et 2100 à Ouangolo selon les scenarios RCP 4.5 et 8.5

Mois	RCP 4.5					RCP 8.5			
	1986-2005	2031-2050	ΔP1%	2081-2100	ΔP2%	2031-2050	ΔP1%	2081-2100	ΔP2%
Janvier	2,1	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,0	-100,0
Février	7,2	0,0	-100,0	0,0	-100,0	0,9	-87,4	0,0	-100,0
Mars	23,2	2,3	-90,3	6,6	-71,6	5,3	-77,4	7,6	-67,3
Avril	78,6	58,8	-25,2	44,9	-42,9	10,8	-88,8	4,9	-93,7
Mai	94,9	83,6	-11,9	38,4	-59,5	63,6	-33,0	38,4	-59,5
Juin	131,5	121,0	-8,0	123,5	-6,1	121,0	-8,0	123,5	-6,1
Juillet	182,4	262,9	44,1	249,9	37,0	262,9	44,1	259,9	42,4
Août	230,2	207,9	-9,7	279,3	21,4	207,9	-9,7	189,3	25,7
Septembre	178,4	122,0	24,4	97,3	-45,4	222,0	24,4	107,3	-39,8
Octobre	90,0	78,6	-12,7	131,7	46,3	78,6	-12,7	131,7	46,3
Novembre	19,0	13,4	-29,8	15,2	-20,3	13,4	-29,8	15,2	-20,3
Décembre	2,2	0,0	-100,0	0,0	-97,8	0,0	-100,0	0,0	-97,8
Moyenne									
Annuelle	1039,7	1050,3	10	986,8	-5,1	986,2	-5,1	877,8	-15,6

RESUME

Cette étude a pour objectif d'évaluer les tendances d'évolution des précipitations et des températures futures et leurs impacts sur les ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama. Pour ce faire, les sorties du modèle climatique régional RCA4 ainsi que les données historiques provenant de cinq (05) stations pluviométriques ont été utilisées. Les résultats de simulation du climat futur issus du modèle RCA4 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 indiquent que la température annuelle pourrait augmenter de 1°C à 3,3 °C. Ces augmentations seront plus importantes selon le scénario RCP8.5 à l'horizon 2081-2100. Les précipitations annuelles connaîtront une baisse de 4,14% à 13,57% à l'horizon 2031-2050 selon le RCP4.5 et 9,18% à 19,53% selon RCP 8.5. L'analyse de l'évolution des débits des horizons futurs (2031-2050 et 2081-2100) montre que les volumes d'eau écoulés seront en baisse les années à venir quel que soit le scénario considéré. En termes de dynamique, il n'y a pas de modification du régime hydrologique : les périodes des basses eaux et des hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période 1986-2005. Pour le RCP 4.5, les volumes d'eau écoulés vont baisser à l'horizon 2031-2050 soit (31 mm) ; par la suite ces écoulements connaîtront une reprise (augmentation) de l'ordre de 28,03 mm par rapport à l'horizon 2031-2050. Pour le RCP 8.5, les simulations montrent que les volumes d'eau écoulés vont baisser sur tous les horizons. Ces résultats constituent un important outil d'aide à la décision pour l'amélioration de la gestion des ressources en eau dans les complexes sucriers de Ferkessédougou.

Mots clés : précipitations ; température ; changements climatiques; Haut Bandama

ABSTRACT

The objective of this study is to assess trends in future rainfall and temperature changes and their impacts on the water resources of the Upper Bandama watershed. To do so, the outputs of the RCA4 regional climate model as well as historical data from five (05) rainfall stations were used. The simulation results of the future climate from the RCA4 model according to the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios indicate that the annual temperature could increase by 1°C to 3.3°C. These increases will be greater under scenario RCP 8.5 for the 2081-2100 horizon. Annual precipitation would decrease from 4.14% to 13.57% by 2031-2050 according to RCP 4.5 and 9.18% to 19.53% according to RCP 8.5. Analysis of the evolution of flow rates for the future horizons (2031-2050 and 2081-2100) shows that the volumes of water discharged will decrease in the coming years regardless of the scenario considered. In terms of dynamics, there is no change in the hydrological regime: the periods of low water and high water remain identical to those observed over the period 1986-2005. For RCP 4.5, the volumes of water flowing will decrease at the horizon 2031-2050, i.e. (31 mm); thereafter these flows will recover (increase) by about 28.03 mm compared to the horizon 2031-2050. For RCP 8.5, the simulations show that the volumes of water flowing will decrease over all horizons. These results constitute an important decision support tool for improving water resource management in the Ferkessédougou sugar complexes.

Keywords: rainfall; temperature; climate change; Haut Bandama